

Trabajo Fin de Grado
Ingeniería Civil

Método de dosificación de hormigones
autocompactantes reforzados con fibras de acero y
análisis experimental de su comportamiento en
fractura y tenacidad

Autor: Andrés Muñoz Leal

Tutor: Héctor Cifuentes Bulté

Dep. de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de
Estructuras
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería Civil

**Método de dosificación de hormigones
autocompactantes reforzados con fibras de acero y
análisis experimental de su comportamiento en
fractura y tenacidad**

Autor:
Andrés Muñoz Leal

Tutor:
Héctor Cifuentes Bulté
Profesor Contratado Doctor

Dep. de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2016

Trabajo Fin de Grado: Método de dosificación de hormigones autocompactantes reforzados con fibras de acero y análisis experimental de su comportamiento en fractura y tenacidad

Autor: Andrés Muñoz Leal

Tutor: Héctor Cifuentes Bulté

El tribunal nombrado para juzgar el Trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal

A mis padres, Andrés y María Luz

*A mis profesores, especialmente
a mi tutor Héctor Cifuentes Bulté*

A mis compañeros y amigos

AGRADECIMIENTOS

Cuatro años de formación en la Escuela nos llevan a todos los alumnos por un camino lleno de experiencias de toda índole, aquellas que con el paso del tiempo recordaremos con una sonrisa. Cuatro años que difícilmente se puedan recoger en estas líneas pero que al menos se intentará.

En primer lugar quiero agradecer el apoyo y cariño que me han dado mis padres, sin ellos hubiese sido imposible llegar hasta aquí. Ellos y mi familia han sido un pilar fundamental durante este tiempo.

A mis compañeros y ahora después de tanto vivido, también amigos, aquellos que nunca han dudado en animarme y ayudarme en este camino, que conocen de primera mano lo difícil que es cumplir el sueño de ser ingeniero. Muchas gracias.

Agradecer a todos los profesores, que cada uno a su manera, han conseguido formarme y motivarme para alcanzar este objetivo, y en especial a mi tutor, Héctor Cifuentes, que me ha guiado en el final de mi enseñanza. También a Emilio Javier Gómez, que sin su inestimable ayuda no podría estar presentando este trabajo.

Por último no me gustaría dejar pasar la oportunidad de agradecer al resto de personal que trabaja en la Escuela y que hace posible que nos sintamos cómodos en clase y en la biblioteca.

Andrés Muñoz Leal

Sevilla, 2016

RESUMEN

El Trabajo realizado consiste en desarrollar un método novedoso para conseguir certificar y caracterizar una dosificación de hormigones autocompactantes reforzados con fibras de acero basado en el estudio y procedimiento ya validado por otros autores entre los que se encuentra Bushan L. Karihaloo, ingeniero, investigador y profesor de la universidad de Cardiff.

Para llevar a cabo esta tarea se han realizado tres dosificaciones distintas con tres resistencias a compresión objetivo diferentes, 40,60 y 80 MPa, una misma viscosidad teórica de 9 Pa·s para ajustar y una misma cantidad de grava de 756 Kg/m³ y corroborar el método propuesto por Karihaloo et al., además ha servido para ajustar el superplastificante a adicionar en las amasadas. Posteriormente, y con la misma dosificación y materiales, se han introducido fibras de acero hasta alcanzar 60 Pa·s de viscosidad volviendo a ajustar la dosis de superplastificante para que el hormigón reforzado también sea autocompactante. El ensayo que se ha utilizado para calificar las mezclas como autocompactantes es el cono Abrams con el que visualmente se observa el comportamiento en estado fresco.

Una vez realizados los ajustes en las dosificaciones se ha realizado el llenado de moldes para la posterior obtención de probetas cúbicas, cilíndricas y prismáticas de hormigón para caracterizar las cualidades de las mezclas en estado endurecido. Un total de 94 probetas de distintos tamaños y formas han sido elaboradas con el objetivo de tener un espacio muestral lo suficientemente amplio como para hacer un análisis experimental y estadístico de su comportamiento en fractura y tenacidad.

Ilustración 0-1. Moldes utilizados para la elaboración de las probetas



Los ensayos realizados al hormigón endurecido son:

- Ensayo para obtener la resistencia a compresión
- Ensayo para obtener el módulo elástico
- Ensayo para obtener la resistencia a tracción indirecta
- Ensayo para obtener la energía de fractura
- Ensayo de tenacidad para hormigón con fibras de acero

Por último, los resultados obtenidos se compararán y se llevarán a cabo las conclusiones del análisis, buscando en todas ellas una explicación física a los acontecimientos medidos y observados.

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Índice	xiii
Índice de Tablas	xv
Índice de Ilustraciones	xvii
1 Introducción y objetivos	23
2 Materiales empleados en la fabricación del hormigón	25
2.1 Grava	25
2.2 Arena	26
2.3 Filler calizo	26
2.4 Cemento	27
2.5 Superplastificante	27
2.6 Agua	28
2.7 Fibras de acero	28
3 Método de dosificación de hormigón autocompactante desarrollado por Bushan L. Karihaloo	31
3.1 Descripción del método para obtener la dosificación sin adición de fibras	32
3.1.1 Resistencia a compresión	32
3.1.2 Viscosidad plástica	32
3.2 Descripción del método para obtener la dosificación con adición de fibras	35
3.3 Elección de las dosificaciones de hormigón autocompactante objetivo	37
4 Ensayos realizados para caracterizar las dosificaciones objetivo	41
4.1 Cono de Abrams	42
4.2 Ensayo para obtener la resistencia a compresión	46
4.3 Ensayo para obtener el modulo elástico	63
4.4 Ensayo para obtener la resistencia a tracción indirecta	101
4.5 Ensayo para obtener la energía de fractura	110
4.6 Ensayo de tenacidad para hormigón con fibras de acero	137
5 Discusión de resultados	161
6 Conclusiones	163
7 Desarrollos futuros	165
Anexo A	167
Anexo B	171
Bibliografía	176

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1. Rangos típicos en las dosificaciones de hormigón autocompactante según la EFNARC. [7]	31
Tabla 3-2. Viscosidad plástica estimada de la pasta a partir de la relación agua-cemento	34
Tabla 3-3. Densidad de los materiales utilizados	35
Tabla 3-4. Viscosidad plástica estimada de la pasta a partir de la relación agua-cemento	36
Tabla 3-5. Densidad de los materiales utilizados	36
Tabla 3-6. Dosificación en kg/m ³ teórica de hormigón autocompactante 9 Pa·s y 40 MPa	38
Tabla 3-7. Comprobación del cumplimiento de la EFNARC para hormigón autocompactante 9 Pa·s y 40 MPa	38
Tabla 3-8. Dosificación en kg/m ³ teórica de hormigón autocompactante 9 Pa·s y 60 MPa	38
Tabla 3-9. Comprobación del cumplimiento de la EFNARC para hormigón autocompactante 9 Pa·s y 60 MPa	38
Tabla 3-10. Dosificación en kg/m ³ teórica de hormigón autocompactante 9 Pa·s y 80 MPa	39
Tabla 3-11. Comprobación del cumplimiento de la EFNARC para hormigón autocompactante 9 Pa·s y 80 MPa	39
Tabla 3-12. Dosificación en kg/m ³ teórica de hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero 60 Pa·s y 40 MPa	39
Tabla 3-13. Comprobación del cumplimiento de la EFNARC para hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero 60 Pa·s y 40 MPa	39
Tabla 3-14. Dosificación en kg/m ³ teórica de hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero 60 Pa·s y 60 MPa	40
Tabla 3-15. Comprobación del cumplimiento de la EFNARC para hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero 60 Pa·s y 60 MPa	40
Tabla 3-16. Dosificación en kg/m ³ teórica de hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero 60 Pa·s y 80 MPa	40
Tabla 3-17. Comprobación del cumplimiento de la EFNARC para hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero 60 Pa·s y 80 MPa	40
Tabla 4-1. Resumen de valores de ensayo a compresión del hormigón autocompactante de 40MPa	50
Tabla 4-2. Resumen de valores de ensayo a compresión del hormigón autocompactante de 60MPa	54
Tabla 4-3. Resumen de valores de ensayo a compresión del hormigón autocompactante de 80MPa	57
Tabla 4-4. Resumen de valores de ensayo a compresión del hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero de 40MPa	59
Tabla 4-5. Resumen de valores de ensayo a compresión del hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero de 60MPa	61
Tabla 4-6. Resumen de valores de ensayo a compresión del hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero de 80MPa	63
Tabla 4-7. Tabla de datos estadísticos de las muestras de hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero 60 Pa·s y 40MPa	147
Tabla 4-8. Tabla de datos estadísticos de las muestras de hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero 60 Pa·s y 60MPa	152
Tabla 4-9. Tabla de datos estadísticos de las muestras de hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero 60 Pa·s y 80MPa	160

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 0-1. Moldes utilizados para la elaboración de las probetas	xi
Ilustración 2-1. Acopio de grava utilizado en las dosificaciones	25
Ilustración 2-2. Acopio de arena utilizado en las dosificaciones	26
Ilustración 2-3. Acopio de filler calizo utilizado en las dosificaciones	26
Ilustración 2-4. Acopio de cemento utilizado en las dosificaciones	27
Ilustración 2-5. Superplastificante utilizado en las dosificaciones	27
Ilustración 2-6. Curva tensión-deformación de las fibras de acero [25]	28
Ilustración 2-7. Fibras de acero utilizadas en las dosificaciones	29
Ilustración 4-1. Cono de Abrams y mesa calibrada	42
Ilustración 4-2. Fotografías del ensayo de hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero 60 Pa·s y 40 MPa	44
Ilustración 4-3. Fotografías del ensayo de hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero 60 Pa·s y 80 MPa	45
Ilustración 4-4. Ensayo a compresión AML_CUB_40_1	46
Ilustración 4-5. Ensayo a compresión AML_CUB_40_2	47
Ilustración 4-6. Ensayo a compresión AML_CUB_40_3	47
Ilustración 4-7. Ensayo a compresión AML_CUB_40_4	48
Ilustración 4-8. Ensayo a compresión AML_CCUB_40_1	48
Ilustración 4-9. Ensayo a compresión AML_CCUB_40_2	49
Ilustración 4-10. Ensayo a compresión AML_CCUB_40_3	49
Ilustración 4-11. Ensayo a compresión AML_CUB_60_1	51
Ilustración 4-12. Ensayo a compresión AML_CUB_60_2	51
Ilustración 4-13. Ensayo a compresión AML_CUB_60_3	52
Ilustración 4-14. Ensayo a compresión AML_CUB_60_4	52
Ilustración 4-15. Ensayo a compresión AML_CCUB_60_1	53
Ilustración 4-16. Ensayo a compresión AML_CCUB_60_2	53
Ilustración 4-17. Ensayo a compresión AML_CCUB_60_3	54
Ilustración 4-18. Ensayo a compresión AML_CUB_80_1	55
Ilustración 4-19. Ensayo a compresión AML_CUB_80_2	55
Ilustración 4-20. Ensayo a compresión AML_CUB_80_3	56
Ilustración 4-21. Ensayo a compresión AML_CCUB_80_2	56
Ilustración 4-22. Ensayo a compresión AML_CCUB_80_3	57
Ilustración 4-23. Ensayo a compresión AML_CUB_40F_1	58
Ilustración 4-24. Ensayo a compresión AML_CUB_40F_2	58
Ilustración 4-25. Ensayo a compresión AML_CUB_40F_3	58
Ilustración 4-26. Ensayo a compresión AML_CUB_40F_4	59
Ilustración 4-27. Ensayo a compresión AML_CUB_60F_1	60

Ilustración 4-28. Ensayo a compresión AML_CUB_60F_2	60
Ilustración 4-29. Ensayo a compresión AML_CUB_60F_3	60
Ilustración 4-30. Ensayo a compresión AML_CUB_60F_4	61
Ilustración 4-31. Ensayo a compresión AML_CUB_80F_1	62
Ilustración 4-32. Ensayo a compresión AML_CUB_80F_2	62
Ilustración 4-33. Ensayo a compresión AML_CUB_80F_3	62
Ilustración 4-34. Ensayo a compresión AML_CUB_80F_4	63
Ilustración 4-35. Anillos y transductores lvdt utilizados	64
Ilustración 4-36. Ciclos para la determinación del módulo secante de elasticidad estabilizado (Método B)	64
Ilustración 4-37. Ciclos de carga de AML_CIL_40_1	66
Ilustración 4-38. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_40_1 según el promedio de los trazadores	66
Ilustración 4-39. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_40_1 según las bandas extensiométricas	67
Ilustración 4-40. Ciclos de carga de AML_CIL_40_2	67
Ilustración 4-41. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_40_2 según el promedio de los trazadores	68
Ilustración 4-42. Ciclos de carga de AML_CIL_40_3	68
Ilustración 4-43. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_40_3 según el promedio de los trazadores	69
Ilustración 4-44. Fotografía del ensayo de la muestra AML_CIL_40_3	69
Ilustración 4-45. Ciclos de carga de AML_CIL_60_1	70
Ilustración 4-46. Fotografía del ensayo de la muestra AML_CIL_60_1	70
Ilustración 4-47. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_60_1 según el trazador 2	71
Ilustración 4-48. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_60_1 según las bandas extensiométricas	71
Ilustración 4-49. Ciclos de carga de AML_CIL_60_2	72
Ilustración 4-50. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_60_2 según el promedio de los trazadores	72
Ilustración 4-51. Fotografía del ensayo de la muestra AML_CIL_60_2	73
Ilustración 4-52. Ciclos de carga de AML_CIL_60_3	73
Ilustración 4-53. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_60_3 según el promedio de los trazadores	74
Ilustración 4-54. Fotografía del ensayo de la muestra AML_CIL_60_3	74
Ilustración 4-55. Ciclos de carga de AML_CIL_60_4	75
Ilustración 4-56. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_60_4 según el trazador 1	75
Ilustración 4-57. Fotografía del ensayo de la muestra AML_CIL_60_4	76
Ilustración 4-58. Ciclos de carga de AML_CIL_80_1	77
Ilustración 4-59. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_80_1 según el promedio de los trazadores	77
Ilustración 4-60. Fotografía del ensayo de la muestra AML_CIL_80_1	78

Ilustración 4-61. Ciclos de carga de AML_CIL_80_2	78
Ilustración 4-62. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_80_2 según el promedio de los trazadores	79
Ilustración 4-63. Fotografía del ensayo de la muestra AML_CIL_80_2	79
Ilustración 4-64. Ciclos de carga de AML_CIL_80_3	80
Ilustración 4-65. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_80_3 según el promedio de los trazadores	80
Ilustración 4-66. Fotografía del ensayo de la muestra AML_CIL_80_3	81
Ilustración 4-67. Ciclos de carga de AML_CIL_80_4	81
Ilustración 4-68. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_80_4 según el promedio de los trazadores	82
Ilustración 4-69. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_80_4 según las bandas extensiométricas	82
Ilustración 4-70. Fotografía del ensayo de la muestra AML_CIL_80_4	82
Ilustración 4-71. Ciclos de carga de AML_CIL_40F_1	84
Ilustración 4-72. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_40F_1 según el promedio de los trazadores	84
Ilustración 4-73. Fotografía del ensayo de la muestra AML_CIL_40F_1	85
Ilustración 4-74. Ciclos de carga de AML_CIL_40F_2	85
Ilustración 4-75. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_40F_2 según el promedio de los trazadores	86
Ilustración 4-76. Fotografía del ensayo de la muestra AML_CIL_40F_2	86
Ilustración 4-77. Ciclos de carga de AML_CIL_40F_3	87
Ilustración 4-78. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_40F_3 según el promedio de los trazadores	87
Ilustración 4-79. Fotografía del ensayo de la muestra AML_CIL_40F_3	88
Ilustración 4-80. Ciclos de carga de AML_CIL_60F_1	89
Ilustración 4-81. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_60F_1 según el promedio de los trazadores	89
Ilustración 4-82. Fotografía del ensayo de la muestra AML_CIL_60F_1	90
Ilustración 4-83. Ciclos de carga de AML_CIL_60F_2	90
Ilustración 4-84. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_60F_2 según el promedio de los trazadores	91
Ilustración 4-85. Fotografía del ensayo de la muestra AML_CIL_60F_2	91
Ilustración 4-86. Ciclos de carga de AML_CIL_60F_3	92
Ilustración 4-87. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_60F_3 según el promedio de los trazadores	92
Ilustración 4-88. Fotografía del ensayo de la muestra AML_CIL_60F_3	93
Ilustración 4-89. Ciclos de carga de AML_CIL_60F_4	93
Ilustración 4-90. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_60F_4 según el promedio de los trazadores	94
Ilustración 4-91. Fotografía del ensayo de la muestra AML_CIL_60F_4	94
Ilustración 4-92. Ciclos de carga de AML_CIL_80F_1	95

Ilustración 4-93. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_80F_1 según el promedio de los trazadores	95
Ilustración 4-94. Fotografía del ensayo de la muestra AML_CIL_80F_1	96
Ilustración 4-95. Ciclos de carga de AML_CIL_80F_2	96
Ilustración 4-96. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_80F_2 según el promedio de los trazadores	97
Ilustración 4-97. Fotografía del ensayo de la muestra AML_CIL_80F_2	97
Ilustración 4-98. Ciclos de carga de AML_CIL_80F_3	98
Ilustración 4-99. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_80F_3 según el promedio de los trazadores	98
Ilustración 4-100. Fotografía del ensayo de la muestra AML_CIL_80F_3	99
Ilustración 4-101. Ciclos de carga de AML_CIL_80F_4	99
Ilustración 4-102. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_80F_4 según el promedio de los trazadores	100
Ilustración 4-103. Fotografía del ensayo de la muestra AML_CIL_80F_4	100
Ilustración 4-104. Tensiones generadas por el ensayo brasileño [28].	101
Ilustración 4-105. Dispositivo de ensayo para probetas cilíndricas [29]	101
Ilustración 4-106. Fotografías del ensayo brasileño de la muestra AML CIL 40 1	102
Ilustración 4-107. Fotografías del ensayo brasileño de la muestra AML CIL 40 2	102
Ilustración 4-108. Fotografías del ensayo brasileño de la muestra AML CIL 40 3	102
Ilustración 4-109. Fotografías del ensayo brasileño de la muestra AML CIL 60 2	103
Ilustración 4-110. Fotografías del ensayo brasileño de la muestra AML CIL 60 3	103
Ilustración 4-111. Fotografías del ensayo brasileño de la muestra AML CIL 60 4	103
Ilustración 4-112. Fotografías del ensayo brasileño de la muestra AML CIL 80 1	104
Ilustración 4-113. Fotografías del ensayo brasileño de la muestra AML CIL 80 2	104
Ilustración 4-114. Fotografías del ensayo brasileño de la muestra AML CIL 80 3	104
Ilustración 4-115. Fotografías del ensayo brasileño de la muestra AML CIL 80 4	105
Ilustración 4-116. Fotografías del ensayo brasileño de la muestra AML CIL 40F 1	105
Ilustración 4-117. Fotografías del ensayo brasileño de la muestra AML CIL 40F 2	106
Ilustración 4-118. Fotografías del ensayo brasileño de la muestra AML CIL 40F 3	106
Ilustración 4-119. Fotografías del ensayo brasileño de la muestra AML CIL 60F 1	106
Ilustración 4-120. Fotografías del ensayo brasileño de la muestra AML CIL 60F 2	107
Ilustración 4-121. Fotografías del ensayo brasileño de la muestra AML CIL 60F 3	107
Ilustración 4-122. Fotografías del ensayo brasileño de la muestra AML CIL 60F 4	107
Ilustración 4-123. Fotografías del ensayo brasileño de la muestra AML CIL 80F 1	108
Ilustración 4-124. Fotografías del ensayo brasileño de la muestra AML CIL 80F 2	108
Ilustración 4-125. Fotografías del ensayo brasileño de la muestra AML CIL 80F 3	108
Ilustración 4-126. Fotografías del ensayo brasileño de la muestra AML CIL 80F 4	109
Ilustración 4-127. Gráfica P- δ y valor de $W_{0.1}$ de la muestra AML_ST_40_1_1	114
Ilustración 4-128. Fotografías del ensayo de energía de fractura de AML_ST_40_1_1	114

Ilustración 4-129. Gráfica P- δ y valor de $W_{0.1}$ de la muestra AML_ST_40_1_2	115
Ilustración 4-130. Fotografías del ensayo de energía de fractura de AML_ST_40_1_2	115
Ilustración 4-131. Gráfica P- δ y valor de $W_{0.1}$ de la muestra AML_ST_40_1_3	116
Ilustración 4-132. Fotografías del ensayo de energía de fractura de AML_ST_40_1_3	116
Ilustración 4-133. Gráfica P- δ y valor de $W_{0.1}$ de la muestra AML_ST_40_1_4	117
Ilustración 4-134. Fotografías del ensayo de energía de fractura de AML_ST_40_1_4	117
Ilustración 4-135. Gráfica P- δ y valor de $W_{0.6}$ de la muestra AML_ST_40_6_1	118
Ilustración 4-136. Fotografías del ensayo de energía de fractura de AML_ST_40_6_1	118
Ilustración 4-137. Gráfica P- δ y valor de $W_{0.6}$ de la muestra AML_ST_40_6_2	119
Ilustración 4-138. Fotografías del ensayo de energía de fractura de AML_ST_40_6_2	119
Ilustración 4-139. Gráfica P- δ y valor de $W_{0.6}$ de la muestra AML_ST_40_6_3	120
Ilustración 4-140. Fotografías del ensayo de energía de fractura de AML_ST_40_6_3	120
Ilustración 4-141. Gráfica P- δ y valor de $W_{0.6}$ de la muestra AML_ST_40_6_4	121
Ilustración 4-142. Fotografías del ensayo de energía de fractura de AML_ST_40_6_4	121
Ilustración 4-143. Gráfica P- δ y valor de $W_{0.1}$ de la muestra AML_ST_60_1_1	123
Ilustración 4-144. Fotografías del ensayo de energía de fractura de AML_ST_60_1_1	123
Ilustración 4-145. Gráfica P- δ y valor de $W_{0.1}$ de la muestra AML_ST_60_1_2	124
Ilustración 4-146. Fotografías del ensayo de energía de fractura de AML_ST_60_1_2	124
Ilustración 4-147. Gráfica P- δ y valor de $W_{0.1}$ de la muestra AML_ST_60_1_3	125
Ilustración 4-148. Fotografías del ensayo de energía de fractura de AML_ST_60_1_3	125
Ilustración 4-149. Gráfica P- δ y valor de $W_{0.1}$ de la muestra AML_ST_60_1_4	126
Ilustración 4-150. Fotografías del ensayo de energía de fractura de AML_ST_60_1_4	126
Ilustración 4-151. Gráfica P- δ y valor de $W_{0.6}$ de la muestra AML_ST_60_6_1	127
Ilustración 4-152. Fotografías del ensayo de energía de fractura de AML_ST_60_6_1	127
Ilustración 4-153. Gráfica P- δ y valor de $W_{0.6}$ de la muestra AML_ST_60_6_3	128
Ilustración 4-154. Fotografías del ensayo de energía de fractura de AML_ST_60_6_3	128
Ilustración 4-155. Gráfica P- δ y valor de $W_{0.6}$ de la muestra AML_ST_60_6_4	129
Ilustración 4-156. Fotografías del ensayo de energía de fractura de AML_ST_60_6_4	129
Ilustración 4-157. Gráfica P- δ y valor de $W_{0.1}$ de la muestra AML_ST_80_1_2	131
Ilustración 4-158. Fotografías del ensayo de energía de fractura de AML_ST_80_1_2	132
Ilustración 4-159. Gráfica P- δ y valor de $W_{0.1}$ de la muestra AML_ST_80_1_3	133
Ilustración 4-160. Fotografías del ensayo de energía de fractura de AML_ST_80_1_3	133
Ilustración 4-161. Gráfica P- δ y valor de $W_{0.1}$ de la muestra AML_ST_80_1_4	134
Ilustración 4-162. Fotografías del ensayo de energía de fractura de AML_ST_80_1_4	134
Ilustración 4-163. Gráfica P- δ y valor de $W_{0.6}$ de la muestra AML_ST_80_6_2	135
Ilustración 4-164. Fotografías del ensayo de energía de fractura de AML_ST_80_6_2	135
Ilustración 4-165. Configuración de la carga sobre la probeta [31]	137
Ilustración 4-166. Diagramas de carga-CMOD y F_L	138
Ilustración 4-167. Diagrama carga-CMOD y F_j	139

Ilustración 4-168. Diagrama de carga-CMOD de AML_ST_40F_1	140
Ilustración 4-169. Fotografías del ensayo de tenacidad de AML_ST_40F_1	141
Ilustración 4-170. Diagrama de carga-CMOD de AML_ST_40F_2	142
Ilustración 4-171. Fotografías del ensayo de tenacidad de AML_ST_40F_2	143
Ilustración 4-172. Diagrama de carga-CMOD de AML_ST_40F_3	144
Ilustración 4-173. Fotografías del ensayo de tenacidad de AML_ST_40F_3	144
Ilustración 4-174. Diagrama de carga-CMOD de AML_ST_40F_4	146
Ilustración 4-175. Fotografías del ensayo de tenacidad de AML_ST_40F_4	147
Ilustración 4-176. Diagrama de carga-CMOD de AML_ST_60F_2	148
Ilustración 4-177. Fotografías del ensayo de tenacidad de AML_ST_60F_2	149
Ilustración 4-178. Diagrama de carga-CMOD de AML_ST_60F_3	150
Ilustración 4-179. Diagrama de carga-CMOD de AML_ST_60F_4	151
Ilustración 4-180. Fotografías del ensayo de tenacidad de AML_ST_60F_4	152
Ilustración 4-181. Diagrama de carga-CMOD de AML_ST_80F_1	153
Ilustración 4-182. Fotografías del ensayo de tenacidad de AML_ST_80F_1	154
Ilustración 4-183. Diagrama de carga-CMOD de AML_ST_80F_2	155
Ilustración 4-184. Fotografías del ensayo de tenacidad de AML_ST_80F_2	156
Ilustración 4-185. Diagrama de carga-CMOD de AML_ST_80F_3	157
Ilustración 4-186. Fotografías del ensayo de tenacidad de AML_ST_80F_3	158
Ilustración 4-187. Diagrama de carga-CMOD de AML_ST_80F_4	159
Ilustración 4-188. Fotografías del ensayo de tenacidad de AML_ST_80F_4	160
Ilustración 7-1. Disco de hormigón para realizar cristalografía	165

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La necesidad humana de construir y levantar edificaciones ha sido y sigue siendo un reto para las civilizaciones. Para ello se necesitan materiales que puedan unirse de manera química y/o mecánica y además que cumplan con ciertos requisitos estructurales y constructivos dependiendo de la labor que desempeñen.

El avance de la tecnología y el conocimiento de los materiales han permitido cambiar el concepto de hormigón y su composición a lo largo del tiempo. Los primeros hormigones, encontrados en Chile [1] que datan del año 3.000 A.C., contenían como conglomerante algas calcinadas mezcladas con agua de mar, hoy en día la definición que contempla la Real Academia Española es la siguiente:

Material que resulta de la mezcla de agua, arena, grava y cemento o cal, y que, al fraguar, adquiere más resistencia.

Nada que ver con aquella pasta rudimentaria chilena ni con la conocida puzolana del Imperio Romano creada a partir de los materiales volcánicos encontrados a los pies del Vesubio.

Tras mil años de olvido, el resurgir del hormigón a finales del siglo XVIII y principios del XIX viene de la mano de personajes como Smeaton, Vicat y Aspdin quienes, junto con la revolución industrial, pusieron en auge este material compuesto. Y es a partir de la Exposición Universal de París en 1889 cuando, la introducción del hormigón armado impulsa definitivamente el conocimiento y uso de esta piedra que fabricamos, tal y como la definió el arquitecto francés Auguste Perret.

Los cementos y áridos con los que se realizan ahora los hormigones no guardan mucha similitud con los originales, tanto por el método de fabricación como granulometría y composición. A su vez el empleo de aditivos que mejoran las características mecánicas del material ha permitido tener una gran variedad de hormigones entre los que se encuentran los autocompactantes.

El hormigón autocompactante surge en Japón en la década de 1980 gracias al uso de nuevos superplastificantes. Las características de estos hormigones son:

- Gran fluidez, manteniendo una cohesión adecuada para evitar segregación y exudación
- No precisa vibrado, compactándose por la acción de su propio peso
- Poca influencia de la puesta en obra en su calidad
- Gran facilidad de relleno de moldes
- Facilidad de paso entre barras de acero

En este Trabajo nos centraremos en dos de los inconvenientes de estos hormigones como es obtener su dosificación y la determinación de sus propiedades, ya sea como hormigón fresco como endurecido. Además se introducirán fibras de acero que como se verá posteriormente mejorará sus características como hormigón endurecido pero dificultará la calidad de autocompactante.

El hormigón reforzado con fibras, que se incorporan al mismo en el momento del amasado, es una técnica surgida en los años 70. Las fibras se distribuyen de una forma homogénea dentro de la matriz aumentando sus prestaciones frente a impacto, flexión, tracción y fisuración.

Para conseguir hormigones con y sin fibras con la calidad de autocompactante seguiremos el método propuesto por Bushan Lal Karihaloo en los artículos [2] y [3]. También se han seguido las recomendaciones de The European Federation of National Associations Representing producers and applicators of specialist buiding products for Concrete (EFNARC).

El Trabajo se estructura de forma que, una vez puestos en situación y fijados los objetivos del mismo, el punto 2 enumera los materiales y sus propiedades que han sido utilizados en las dosificaciones de hormigón. En el 3 se detalla el método para obtener hormigones autocompactantes creado y validado por Bushan L. Karihaloo así como las mezclas elegidas para ser analizadas experimentalmente. En el siguiente apartado se testan y caracterizan los hormigones tanto en estado fresco como endurecido y ya en los capítulos 5 y 6 se comparan los resultados obtenidos para al final alcanzar las conclusiones de lo previamente observado y registrado.

2 MATERIALES EMPLEADOS EN LA FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN

Los materiales empleados en la fabricación del hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero en este Trabajo son los siguientes:

- Grava
- Arena
- Filler Calizo
- Cemento
- Agua
- Superplastificante
- Fibras de acero

2.1 Grava

La grava triturada forma el esqueleto mineral del hormigón dotándole de resistencia y consistencia. La forma de las partículas es cúbica y no contiene lascas ni agujas que comprometería las características de la mezcla. No se ha procedido al lavado de los áridos gruesos debido al beneficio de los finos en el carácter autocompactante del hormigón. Tienen un peso específico de 2800 kg/m^3 .

Ilustración 2-1. Acopio de grava utilizado en las dosificaciones



2.2 Arena

La arena, que junto con la grava forman entre el 75% y 90% en volumen de la mezcla, es fundamental a la hora de obtener las características del hormigón fresco y endurecido. Para denotar la importancia de la arena en el hormigón, se probó primeramente con una arena de enfoscar, de baja calidad, que en las pruebas de hormigón fresco requería tal cantidad de agua que el efecto del superplastificante era inapreciable, teniendo que cambiar de árido fino a una arena de más calidad que diese los resultados esperados al añadir este aditivo. El material utilizado finalmente tiene una densidad de 2650 kg/m^3 .

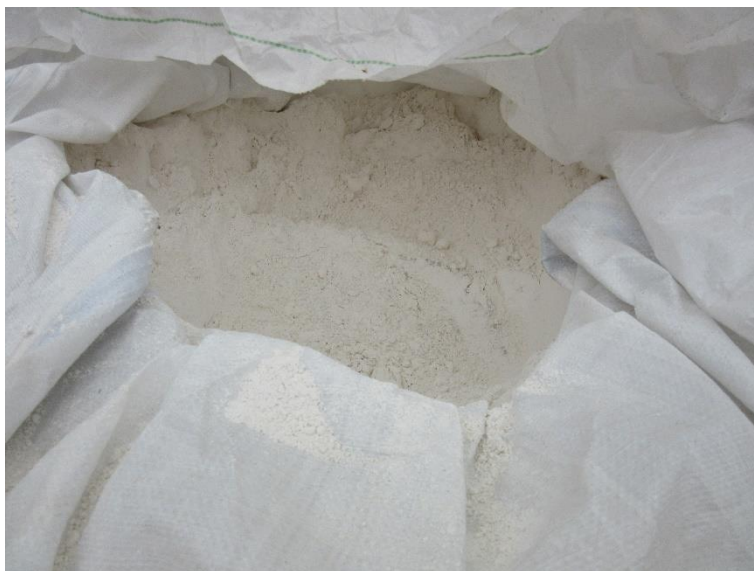
Ilustración 2-2. Acopio de arena utilizado en las dosificaciones



2.3 Filler calizo

El hormigón autocompactante presenta unas resistencias iniciales y finales muy importantes gracias a la compacidad que proporciona el filler en especial si es muy fino y de origen calizo. Este carácter compacto que aporta el filler también mejora la durabilidad del hormigón. Una de las reacciones que contribuyen al aumento de la resistencia mecánica es la epitaxia, que se forma cuando en su reacción de hidratación, el cemento cristaliza sobre el filler [24]. El material empleado tiene un peso específico de 1700 kg/m^3 y es suministrado por Taljedi S.L.

Ilustración 2-3. Acopio de filler calizo utilizado en las dosificaciones



2.4 Cemento

El cemento es un conglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico finamente molido que amasado con agua, forma una pasta que fragua y endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación y que, una vez endurecido conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua.

La escoria de alto horno puede sustituir en cierto porcentaje al cemento actuando como material cementicio, sin embargo se ha optado por utilizar solamente cemento portland CEM I 52,5 N-SR 5 UNE-EN 197-1 provistos por PORTLAND VALDERRIVAS con un peso específico de 3100 kg/m^3 .

Ilustración 2-4. Acopio de cemento utilizado en las dosificaciones



2.5 Superplastificante

El superplastificante utilizado es el MasterGlenium 355C, un reductor de agua de alta actividad basado en éters policarboxílicos modificados. Este aditivo se adiciona con la última parte de agua del amasado.

Muchas de las características de los hormigones, especialmente las relacionadas con la durabilidad de los materiales, tienen que ver con la estructura capilar del mismo. La minimización del volumen total de poros y su conectividad en la matriz cementicia puede conseguirse y diseñarse mediante el uso de estos aditivos. Este superplastificante tiene una densidad de 1040 kg/m^3 .

Ilustración 2-5. Superplastificante utilizado en las dosificaciones



2.6 Agua

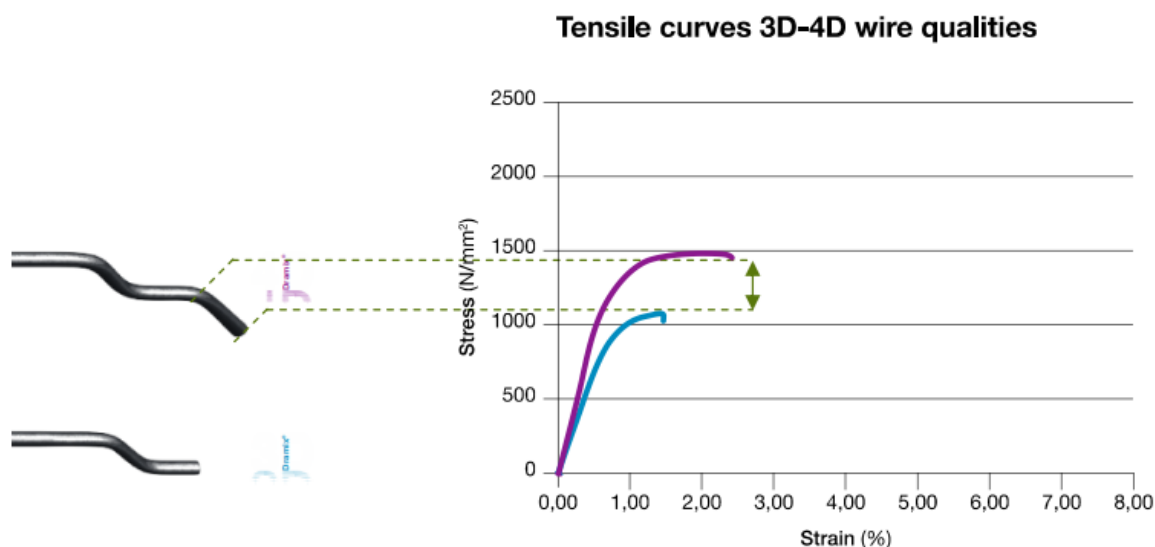
El agua es el componente de más bajo costo para la elaboración del hormigón y asu vez es un elemento tan importante como el cemento, ya que la variación de su contenido en la mezcla influirá directamente en su resistencia, plasticidad, trabajabilidad y permeabilidad.

2.7 Fibras de acero

Las fibras de acero utilizadas en los hormigones reforzados son de la marca BEKAERT de la serie DRAMIX 3D 65/35 BG con las siguientes características:

- Relación de aspecto: 65
- Longitud: 35 mm
- Diámetro de 0,55 mm
- Son encoladas, es decir que vienen en grupos pegadas.
- Presenta una resistencia a tracción de 1345 MPa.
- Tienen un módulo de Young de 210 GPa.

Ilustración 2-6. Curva tensión-deformación de las fibras de acero [25]



Este tipo de fibras son utilizadas en las siguientes aplicaciones [25]:

- Pavimentos (con y sin juntas de corte).
- Cimentaciones para viviendas unifamiliares.
- Hormigón gunitado.
- Tuberías prefabricadas.

Y, además, presentan las siguientes ventajas con respecto a los mallazos de acero:

- Controla la formación de fisuras.
- El refuerzo alcanza toda la pieza.
- No hay problemas de juntas hasta los 8 metros.
- Aumenta la durabilidad del pavimento.
- Mayor resistencia al impacto.

Ilustración 2-7. Fibras de acero utilizadas en las dosificaciones



3 MÉTODO DE DOSIFICACIÓN DE HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE DESARROLLADO POR BUSHAN L. KARIHALOO

El método descrito por el profesor B.L. Karihaloo es el que se va a describir a continuación y el que va a ser guía de nuestra dosificación y posterior estudio de resultados, se detalla en [2].

La validez del método para mezclas de hormigón autocompactante está limitada a viscosidades entre 3 y 15 Pa·s y una resistencia a compresión entre 30 y 80 Mpa a los 28 días.

La dosificación de las mezclas de hormigón autocompactante, requiere de un equilibrio, en primer lugar, entre su fluencia y la capacidad de paso y además entre la resistencia y la segregación [4-6]. La Federación Europea de Asociaciones Nacionales Representativas de productores y consumidores de productos especializados de construcción de Hormigón (EFNARC) proporciona una guía con los valores típicos de ingredientes primarios para su preparación [7]. Las cantidades dependerán de la resistencia deseada y otros requerimientos. Aunque, la mezcla sigue involucrando en gran parte un método de ensayo error.

Tabla 3-1. Rangos típicos en las dosificaciones de hormigón autocompactante según la EFNARC. [7]

Ingredientes	Rango por masa (Kg/m ³)	Rango por volumen (litros/m ³)
Polvo (cemento y filler)	380-600	-
Agua	150-210	150-210
Árido grueso	750-1000	270-360
Relación agua/polvo por volumen	0,85-1,10	
Árido fino	Normalmente 48-55% del peso total de la mezcla	

Un método riguroso de dosificación normal y alta resistencia para hormigones autocompactantes basados en su viscosidad ha sido propuesto en los artículos publicados por Karihaloo y Ghanbari [8], y Deeb y Karihaloo [9]. Esto nos lleva a la expresión para la viscosidad plástica de un hormigón autocompactante usando principios micromecánicos [3]. Esta expresión muestra como aumenta la viscosidad de la pasta por la adición de partículas sólidas. La contribución de cada fase sólida en el aumento global, depende de su fracción de volumen y la forma de sus partículas. Así, la expresión final para la viscosidad plástica de un hormigón autocompactante es el producto de la viscosidad inicial de la pasta y la contribución de cada fase sólida.

3.1 Descripción del método para obtener la dosificación sin adición de fibras

El método propuesto por Karihaloo et al. en sus artículos se rige por dos propiedades, la resistencia a compresión y la viscosidad plástica.

3.1.1 Resistencia a compresión

La resistencia a compresión de una mezcla está mayormente determinada por la relación agua-cemento (A/C) bajo ciertas condiciones de curado. Se asume que la resistencia a compresión del hormigón autocompactante (MPa) se obtiene con la siguiente relación de Abrams ($R^2 = 0.94$) [9] [10] [11]:

$$f_{cu} = \frac{195}{12.65^{A/C}}$$

f_{cu} : resistencia a compresión (MPa) a los 28 días

A/C: relación agua cemento

Los valores han sido ajustados para probetas cúbicas de 100 mm. Sin embargo, se ha demostrado empíricamente [2] que esta fórmula sobrevalora la resistencia a compresión del cubo a cargas bajas (30-40 MPa) en estos hormigones. Se atribuye este hecho al alto contenido en filler de estas mezclas. Para conseguir mezclas de 30 MPa, se necesita disminuir la relación agua cemento en aproximadamente un 14% y para 40 MPa, un 8%.

3.1.2 Viscosidad plástica

La mezcla de hormigón autocompactante es un fluido no newtoniano, cuyo comportamiento se ajusta por un modelo Bingham. Este modelo contiene dos parámetros reológicos, tensión de fluencia y viscosidad plástica. Sin embargo, la tensión de fluencia del hormigón autocompactante es baja en comparación con hormigones vibrados y sigue siendo así en un amplio rango de viscosidades plásticas. Por tanto el parámetro más importante es la viscosidad plástica [12] que puede ser medido con bastante precisión por un viscosímetro en mezclas homogéneas, pero las mezclas de hormigón son no homogéneas.

El incremento de la viscosidad plástica de una fase líquida como consecuencia de la adición de fases sólidas se estima de manera escalonada [3]. En el primer paso, la fase sólida es la más fina de material sólido. En el siguiente, la fase más fina está formada por la fase sólida suspendida en la fase líquida viscosa, ahora formada por las dos fases en suspensión de la primera fase. Este procedimiento se desarrolla hasta que todas las fases sólidas estén incluidas en la mezcla. La viscosidad plástica de una fase puede ser estimada a partir de la anterior como:

$$\eta_{ci} = \eta_{ci-1} \cdot f_i(\phi_i)$$

$f_i(\phi_i)$: factor mayor que la unidad que predice el incremento de viscosidad inducido por la fase sólida con una fracción de volumen ϕ_i

$$\eta_{mix} = \eta_{paste} \cdot f_1(\phi_1) \cdot f_2(\phi_2) \cdot \dots \cdot f_n(\phi_n)$$

3.1.2.1 Viscosidad a bajas concentraciones

Una baja concentración de la fase sólida es también llamada dilución, en el sentido que las partículas están suficientemente lejos unas de otras, así el movimiento relativo del fluido en una partícula no se ve afectado por la presencia de otras y la interacción hidrodinámica de las partículas pueden ser despreciada [13]. H.A. Einstein [14] fue el primero en obtener la viscosidad de una suspensión diluida de esferas rígidas. Él descubrió que la adición de una segunda fase en una suspensión lleva al incremento en la viscosidad proporcional a la fracción de volumen de las partículas.

$$\eta_r = 1 + [\eta](\phi)$$

Donde η_r es la viscosidad relativa, Φ es el volumen de concentración de partículas y η es la viscosidad intrínseca.

Un valor de $[\eta]=2.5$ es adoptado cuando las partículas son rígidas y empaquetadas aleatoriamente en una disposición hexagonal, y la distancia entre ellas comparada con el propio diámetro de partícula es grande.

Ford [15] modificó la ecuación de Einstein utilizando una expresión binomial:

$$\eta_r = (1 - [\eta]\phi)^{-1}$$

Simha [16] también desarrolló su formulación a partir de la de Einstein:

$$\eta_r = 1 + 2.5f(a_1)\phi$$

Donde $f(a_1)$ es el llamado factor de blindaje, necesario al utilizar un modelo de jaula y la fracción de volumen reducida, Φ / Φ_m , donde Φ_m es la fracción máxima de empaquetamiento.

Basado en los cálculos de Simha para suspensiones concentradas, Thomas [15] llegó a la siguiente relación para suspensiones diluidas:

$$\eta_r = 1 + 2.5f\phi \left(1 + \frac{25\phi}{4a_1^3}\right)$$

Para fracciones de volumen bajas, $a_1: 1.111$.

3.1.2.2 Viscosidad a altas concentraciones

Para mayores concentraciones de partículas, la fracción de volumen no es el único parámetro que influye en la viscosidad. Es necesario considerar el tamaño y tipo de partícula utilizado y su interacción hidrodinámica.

En las formulaciones, la viscosidad de la suspensión se incrementa de dos formas [17]:

- Si la fracción de volumen de partículas sólidas esféricas aumenta.
- En la presencia de otras partículas, el volumen disponible para una partícula adicional disminuye.

Combinando los dos efectos se alcanza la conocida ecuación de Krieger y Dougherty, apropiada para bases cementicias con partículas en suspensión [18]:

$$f_i(\phi_i) = \left(1 - \frac{\phi_i}{\phi_m}\right)^{-[\eta]\phi_m}$$

$\phi_m = 0.74$ para empaquetamiento hexagonal compacto

$\phi_m = 0.63$ para empaquetamiento hexagonal aleatorio

$\phi_m = 0.524$ para empaquetamiento cúbico

Φ_m depende de la distribución del tamaño de partícula. También, de la viscosidad intrínseca $[\eta]$ y de la relación de cizallamiento. Sin embargo $[\eta]$ y ϕ_m cambian de manera que el incremento de una, produce la disminución de la otra, pero el producto de ambas permanece prácticamente constante, 1.9 para esferas rígidas.

Frankel y Acrivos [19] obtuvieron teóricamente una ecuación para la viscosidad de una concentración muy alta de esferas sólidas en suspensión. Cuando Φ tiende a Φ_m :

$$\eta_r = \frac{9}{8} \left(\frac{(\phi/\phi_m)^{\frac{1}{3}}}{1 - (\phi/\phi_m)^{\frac{1}{3}}} \right)$$

Chong et al. [20] obtuvieron una única expresión para cubrir el rango entero de concentraciones de volumen desde Φ cuando tiende 0 hasta cuando se aproxima a Φ_m que encaja bastante bien con los datos experimentales:

$$\eta_r = \left(1 + \frac{[\eta]\phi_m}{2} \left[\frac{\phi/\phi_m}{1 - (\phi/\phi_m)} \right] \right)^2$$

Sin embargo debe ser mencionado que la contribución browniana puede ser despreciada en altas fracciones de volumen. Por ello la ecuación de Chong se reduce a la de Einstein en fracciones bajas de volumen [17].

Las desventajas de aplicar la Φ_m , basada en las relaciones para predecir la viscosidad plástica del hormigón son:

- La dificultad de medir la viscosidad cuando Φ tiende a Φ_m .
- Es difícil determinar la fracción máxima de volumen con precisión, debido al hinchamiento de las partículas.

Ghanbari y Karihaloo [2] han propuesto un procedimiento micromecánico para la estimación de la viscosidad plástica del hormigón autocompactante conociendo la viscosidad plástica de la pasta usada en él.

El volumen de la fracción de burbujas de aire atrapadas es bajo, en torno al 2% y se incluye en la viscosidad de la pasta:

$$\eta_{mix} = \eta_{paste} \cdot \left(1 - \frac{\phi_{filler}}{\phi_m}\right)^{-1.9} \cdot \left(1 - \frac{\phi_{Fine Agg.}}{\phi_m}\right)^{-1.9} \cdot \left(1 - \frac{\phi_{Coarse Agg.}}{\phi_m}\right)^{-1.9}$$

Cuando la primera fase sólida es añadida a la pasta, el empaquetamiento es débil, luego es apropiado asumir empaquetamiento cúbico. Sin embargo en la última fase añadida, el empaquetamiento es muy denso y se supone un empaquetamiento hexagonal compacto.

El método para la obtención de una dosificación de hormigón autocompactante que se propone a continuación es el seguido por Karihaloo en sus artículos. Para ello se ha confeccionado una hoja de MathCad, adjuntada en el anexo A.

Conociendo una resistencia a compresión del hormigón autocompactante, se siguen los siguientes pasos:

1. Seleccionar la viscosidad plástica deseada de la mezcla, entre 3-15 Pa s. La EFNARC ayudará a elegirla en función de la aplicación.
2. Calcular la relación agua cemento que produce la resistencia objetivo.
3. Escoger un contenido en agua entre 150 y 210 kg/m^3 y calcular la masa de materiales cementicios en kg/m^3 . Asumiendo que el porcentaje de escoria de alto horno es del 25%. Aunque más adelante se recalcará que en nuestras mezclas no se han utilizado.
4. Asumir la adición de una dosificación de un superplastificante (SP) como un porcentaje del material cementicio entre 0,4 y 0,8%. También será necesario ajustarlo experimentalmente.
5. Estimar la viscosidad plástica de la pasta a partir de la relación agua cemento. Se utiliza la siguiente tabla:

Tabla 3-2. Viscosidad plástica estimada de la pasta a partir de la relación agua-cemento

w/cm	η_{paste} (Pa·s)	$\eta_{paste + airvoids}$ (Pa·s)
0,63	0,104	0,11
0,57	0,176	0,18
0,53	0,224	0,23
0,47	0,286	0,29
0,40	0,330	0,34
0,35	0,365	0,37

6. Calcular la masa de los ingredientes de cada fase.

Se necesitarán las densidades de los materiales empleados:

Tabla 3-3. Densidad de los materiales utilizados

DENSIDAD	MATERIALES (kg/m ³)					
	Cemento	Agua	Superplastificante	Filler Calizo	Arena	Grava
	3100	1000	1040	1700	2650	2800

7. Comprobar si el total producido en la mezcla es 1 m³. Si no, ajustar las proporciones hasta conseguirlo.
8. Calcular la viscosidad plástica de la mezcla usando la ecuación y comparar con la deseada. Si la diferencia es $\pm 5\%$ se acepta, si no se toman otras combinaciones en las fracciones de volumen de las fases sólidas.

3.2 Descripción del método para obtener la dosificación con adición de fibras

El hormigón autocompactante, como se ha dicho anteriormente, consiste en un agregado de partículas sólidas (fase sólida) suspendidas en la pasta viscosa (fase líquida). Las partículas son modeladas como esferas. El comportamiento viscoso de la suspensión resultante depende de la fracción de volumen de la fase sólida y se vuelve no newtoniano una vez que el volumen de fracción de sólidos alcanza un valor crítico, aproximadamente igual a Φ_m (el máximo volumen de concentración alcanzable). Los otros parámetros que influyen en la viscosidad de la suspensión son la forma, el tamaño, y la distribución de las partículas de la fase sólida, especialmente en altas concentraciones.

La viscosidad del hormigón constituido por fases líquidas y sólidas se incrementa mucho al añadir fibras de acero. La fracción de volumen de las fibras de acero normalmente es pequeña, es por ello que la aproximación de disolución es apropiada. Para estimar el efecto de esta adición, las fibras son tratadas como sólidos rígidos esbeltos [21] que se mueven como tal en un medio viscoso, siendo esta la principal hipótesis. Las predicciones de esta aproximación están bien correlacionadas con los datos experimentales.

Las expresiones teóricas expuestas son generalmente aplicables a una suspensión de partículas sólidas en un fluido viscoso proporciones de cizalladura bajas. Si el hormigón está en estado fresco se asume que es un material isotrópico, entonces la teoría aplicable para proporciones de cizalladura bajas han sido demostradas experimentalmente por Barnes et al. [17] para ser aplicada también para altas proporciones de cizalladura.

El efecto de una concentración diluida (más del 2% en volumen) de fibras esbeltas de acero en la viscosidad plástica del hormigón autocompactante es estimada aplicando la aproximación de cuerpos esbeltos de Russell [21]. En esta aproximación, las fibras son tratadas como sólidos rígidos esbeltos cuya traslación y rotación están restringidas como resultado de la resistencia ofrecida por el hormigón autocompactante viscoso. Dado que la fibra es tratado como un sólido rígido, la fuerza resistente puede estar concentrada en el centro de gravedad de la fibra y es igual a:

$$F_i = \zeta \dot{u}_i$$

Donde \dot{u}_i es la componente del desplazamiento del centro de gravedad de la fibra y:

$$\zeta = \frac{2\pi\eta l}{\ln(2l_d)}$$

Donde η es la viscosidad plástica de la mezcla sin fibras y l_d es la relación de aspecto de la fibra.

$$l_d = \frac{l}{d}$$

Siendo l la longitud y d el diámetro de la fibra utilizada.

Con estas aproximaciones y suponiendo una distribución estadísticamente homogénea y aleatoria de una concentración diluida de fibras en la matriz viscosa, las cuales son improbables que se superpongan, Phan-Thien

y Karihaloo [21] obtuvieron esta expresión para obtener la viscosidad del hormigón reforzado con fibras, a partir de la viscosidad obtenida en la mezcla anterior:

$$\eta_e = \eta \left\{ (1 - \phi) + \frac{\pi \phi l_d^2}{3 \ln(2l_d)} \right\}$$

Por lo tanto el método para hallar la dosificación será muy similar al anterior:

1. Seleccionar la viscosidad plástica deseada de la mezcla, entre 3-15 Pa s. La EFNARC ayudará a elegirla en función de la aplicación.
2. Calcular la relación agua cemento que produce la resistencia objetivo.
3. Escoger un contenido en agua entre 150 y 210 kg/m^3 y calcular la masa de materiales cementicios en kg/m^3 .
4. Asumir la adición de una dosificación de un superplastificante (SP) como un porcentaje del material cementicio entre 0,4 y 0,8%. También será necesario ajustarlo experimentalmente.
5. Estimar la viscosidad plástica de la pasta a partir de la relación agua cemento. Se utiliza la siguiente tabla:

Tabla 3-4. Viscosidad plástica estimada de la pasta a partir de la relación agua-cemento

w/cm	η_{paste} (Pa·s)	$\eta_{\text{paste + airvoids}}$ (Pa·s)
0,63	0,104	0,11
0,57	0,176	0,18
0,53	0,224	0,23
0,47	0,286	0,29
0,40	0,330	0,34
0,35	0,365	0,37

6. Calcular la masa de los ingredientes de cada fase.

Se necesitarán las densidades de los materiales empleados:

Tabla 3-5. Densidad de los materiales utilizados

DENSIDAD	MATERIALES (kg/m^3)					
	Cemento	Agua	Superplastificante	Filler Calizo	Arena	Grava
	3100	1000	1040	1700	2650	2800

7. Comprobar si el total producido en la mezcla es 1 m^3 . Si no, ajustar las proporciones hasta conseguirlo.
8. Calcular la viscosidad plástica de la mezcla usando la ecuación y comparar con la deseada. Si la diferencia es $\pm 5\%$ se acepta, si no se toman otras combinaciones en las fracciones de volumen de las fases sólidas.
9. Se calcula la nueva viscosidad conociendo la relación de aspecto de la fibra, la densidad del acero (7850 kg/m^3) y el porcentaje en volumen que queremos adicionar.
10. Comprobar si el total producido en la mezcla es 1 m^3 . Si no, ajustar las proporciones hasta conseguirlo.

Tal y como se hizo anteriormente se han desarrollado los cálculos en una hoja de MathCad que se expondrá en el Anexo B.

3.3 Elección de las dosificaciones de hormigón autocompactante objetivo

El método que se ha llevado a cabo en las dosificaciones tiene un rango de resistencia a rotura de 30 a 80 Mpa y una horquilla de viscosidades de 9 a 15 Pa·s. También los resultados de las mezclas con fibras de acero son sólo válidos para rangos del 0,1 al 2,5% en volumen, variando la viscosidad ente 20 y 60 Pa·s. En las mezclas realizadas se han seguido las siguientes premisas:

- Se han realizado en total 6 amasadas de resistencia objetivo 40, 60 y 80 MPa, tres sin fibras de acero y otras tres reforzadas.
- La viscosidad objetivo es la mínima que permite el método, 9 Pa·s para hormigón autocompactante sin fibras, para el reforzado con fibras se calculará la dosificación para 60 Pa·s de viscosidad.
- En el hormigón autocompactante de 40 MPa no se ha realizado la disminución de relación agua cemento recomendada por el artículo de Karihaloo.
- No se han añadido escorias de alto horno como material cementicio en ninguno de los hormigones, solo se ha utilizado como tal el cemento.
- Todas las mezclas se han realizado con un número bajo de contenido de gravas, en todas han sido 756 kg/m³.
- El superplastificante se ha ido ajustando experimentalmente según la fluidez de la mezcla en cada momento lo que permite variaciones a pie de obra en cualquier aplicación.
- Se han cumplido las recomendaciones de la Tabla 1 de la EFNARC.
- Se realizaron las pruebas de hormigón fresco para hallar la cantidad de superplastificante óptima en una hormigonera de 7 litros, para realizar las probetas se realizaron en una mayor, de amasadas de 50 litros aproximadamente. En la teoría se aplicó un 0,65% del material cementicio.
- Se realizó una prueba de materiales con arena de baja calidad con resultados insatisfactorios como hormigón fresco, luego cambiamos este árido.
- Hay que tener en cuenta que en la fluidez y resistencia de la mezcla influyen muchos factores, entre ellos la temperatura en la que se hormigona, que en ese momento era elevada.
- En las amasadas de 53 litros se ha tenido una precisión de ± 100 gramos.

HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE 9 PA·S Y 40 MPA

Tabla 3-6. Dosificación en kg/m³ teórica de hormigón autocompactante 9 Pa·s y 40 MPa

fcu	40
viscosidad	9
w (Agua)	184
c (Cemento)	295
ggbs (Escoria de alto horno)	0
SP (Superplastificante)	2
LP (Filler calizo)	192
FA (Arena)	837
CA (Grava)	756

Con un error teórico de 0.039% en la viscosidad.

Tabla 3-7. Comprobación del cumplimiento de la EFNARC para hormigón autocompactante 9 Pa·s y 40 MPa

powder (c+ggbs+LP) (380-600)	487 kg/m ³
w/powder (85%-110%)	88%
FA ratio(48%-55%)	53%

En la práctica se ajustó el superplastificante a 3.1 kg/m³ pasando a ser un 1.05% del material cementicio.

HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE 9 PA·S Y 60 MPA

Tabla 3-8. Dosificación en kg/m³ teórica de hormigón autocompactante 9 Pa·s y 60 MPa

fcu	60
viscosidad	9
w (Agua)	203
c (Cemento)	437
ggbs (Escoria de alto horno)	0
SP (Superplastificante)	3
LP (Filler calizo)	156
FA (Arena)	714
CA (Grava)	756

Con un error teórico de 1.521% en la viscosidad.

Tabla 3-9. Comprobación del cumplimiento de la EFNARC para hormigón autocompactante 9 Pa·s y 60 MPa

powder (c+ggbs+LP) (380-600)	593 kg/m ³
w/powder (85%-110%)	87%
FA ratio(48%-55%)	49%

En la práctica se ajustó el superplastificante a 2.87 kg/m³ pasando a ser un 0.66% del material cementicio.

HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE 9 PA·S Y 80 MPA

Tabla 3-10. Dosificación en kg/m³ teórica de hormigón autocompactante 9 Pa·s y 80 MPa

fcu	80
viscosidad	9
w (Agua)	196
c (Cemento)	558
ggbs (Escoria de alto horno)	0
SP (Superplastificante)	4
LP (Filler calizo)	18
FA (Arena)	845
CA (Grava)	756

Con un error teórico de 0.936% en la viscosidad.

Tabla 3-11. Comprobación del cumplimiento de la EFNARC para hormigón autocompactante 9 Pa·s y 80 MPa

powder (c+ggbs+LP) (380-600)	576 kg/m ³
w/powder (85%-110%)	103%
FA ratio(48%-55%)	53%

En la práctica se ajustó el superplastificante a 5.59 kg/m³ pasando a ser un 1.00% del material cementicio.

HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO 60 PA·S Y 40 MPA

Tabla 3-12. Dosificación en kg/m³ teórica de hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero 60 Pa·s y 40 MPa

fcu	40
viscosidad	60
w (Agua)	183
c (Cemento)	293
ggbs (Escoria de alto horno)	0
SP (Superplastificante)	2
LP (Filler calizo)	191
FA (Arena)	832
CA (Grava)	751
FIBRAS	49

Con un error teórico de 0.039% en la viscosidad.

Tabla 3-13. Comprobación del cumplimiento de la EFNARC para hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero 60 Pa·s y 40 MPa

powder (c+ggbs+LP) (380-600)	484 kg/m ³
w/powder (85%-110%)	88%
FA ratio(48%-55%)	53%

En la práctica se ajustó el superplastificante a 3.52 kg/m³ pasando a ser un 1.20% del material cementicio.

HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO 60 PA·S Y 60 MPA

Tabla 3-14. Dosificación en kg/m³ teórica de hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero 60 Pa·s y 60 MPa

fcu	60
viscosidad	60
w (Agua)	202
c (Cemento)	435
ggbs (Escoria de alto horno)	0
SP (Superplastificante)	3
LP (Filler calizo)	156
FA (Arena)	711
CA (Grava)	753
FIBRAS	48

Con un error teórico de 1.521% en la viscosidad.

Tabla 3-15. Comprobación del cumplimiento de la EFNARC para hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero 60 Pa·s y 60 MPa

powder (c+ggbs+LP) (380-600)	591 kg/m ³
w/powder (85%-110%)	87%
FA ratio(48%-55%)	49%

En la práctica se ajustó el superplastificante a 3.29 kg/m³ pasando a ser un 0.76% del material cementicio.

HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO 60 PA·S Y 80 MPA

Tabla 3-16. Dosificación en kg/m³ teórica de hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero 60 Pa·s y 80 MPa

fcu	80
viscosidad	60
w (Agua)	195
c (Cemento)	555
ggbs (Escoria de alto horno)	0
SP (Superplastificante)	4
LP (Filler calizo)	18
FA (Arena)	841
CA (Grava)	752
FIBRAS	48

Con un error teórico de 1.521% en la viscosidad.

Tabla 3-17. Comprobación del cumplimiento de la EFNARC para hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero 60 Pa·s y 80 MPa

powder (c+ggbs+LP) (380-600)	573 kg/m ³
w/powder (85%-110%)	103%
FA ratio(48%-55%)	53%

En la práctica se ajustó el superplastificante a 5.13 kg/m³ pasando a ser un 0.92% del material cementicio.

4 ENSAYOS REALIZADOS PARA CARACTERIZAR LAS DOSIFICACIONES OBJETIVO

La validación experimental de la dosificación del artículo [1] se demuestra en el artículo [22] donde se realizan los siguientes ensayos a los hormigones autocompactantes obtenidos con el método seguido también en este Trabajo:

- Cono de Abrams
- J-ring
- L-box
- V-funnel
- Ensayo para obtener la resistencia a compresión

Estos test prueban definitivamente la validez del método de dosificación de las mezclas en el sentido del criterio de autocompactación y la resistencia a compresión.

El cono Abrams, J-ring, L-box, y V-funnel son los ensayos utilizados en el estado fresco para conocer la fluidez y el criterio de capacidad de paso sin segregación. Los cubos estándar (100 mm), curados en agua, fueron ensayados a compresión a los 7, 28 y 90 días.

Las mezclas cumplieron con los requisitos de autocompactación, así como la viscosidad plástica y la resistencia a compresión, validando así el método. En el Trabajo se ha intentado validar el método y a su vez conocer más a fondo las cualidades de estos hormigones.

En este Trabajo se realizaron los siguientes ensayos para caracterizar el hormigón autocompactante, tanto fresco como endurecido:

- Cono de Abrams
- Ensayo para obtener la resistencia a compresión
- Ensayo para obtener el módulo elástico
- Ensayo para obtener la resistencia a tracción indirecta
- Ensayo para obtener la energía de fractura (solo para hormigón autocompactante sin fibras)
- Ensayo de tenacidad para hormigones reforzados con fibras de acero

Aparte de estos ensayos se llevan a cabo comprobaciones visuales para verificar que no se produce segregación.

4.1 Cono de Abrams

El cono de Abrams es el ensayo que se realiza al hormigón fresco para medir su consistencia. Para ello se utiliza un cono troncocónico y una bandeja metálica calibrada. En hormigones autocompactantes no se mide la disminución de altura como en los convencionales sino que nos interesan [22]:

- t_{500} : tiempo que tarda el hormigón autocompactante en alcanzar 500 mm de diámetro en el cono de asiento.
- El diámetro máximo de expansión de la torta de hormigón.

El tiempo necesario para alcanzar 500 mm de diámetro está relacionado con la viscosidad plástica de la mezcla.

La tensión de fluencia está relacionada con la expansión máxima del cono de asiento. Este es el motivo por el que se determina una expansión objetivo entre 650 y 750 mm. Esto implica que las mezclas tienen aproximadamente la misma tensión de fluencia y así se halla la viscosidad de la mezcla a partir de la relación con el parámetro t_{500} .

La siguiente afirmación apoya este supuesto:

“La viscosidad plástica de la mezcla suele ser el principal factor que distingue la trabajabilidad de una mezcla respecto a otra. Cambios en la viscosidad plástica puede directamente reflejar cambios en los materiales o en sus proporciones, haciendo del valor del t_{500} un parámetro de control”

Fowler DW, Breen JE, Folliard KJ, Juenger MCG, Wheat HG. Aggregates in self-consolidating concrete. International Center for Aggregates Research (ICAR) Final Report: the University of Texas at Austin, USA; 2007.

Un valor diferente de la fluidez llevará consigo necesariamente un t_{500} distinto.

Ilustración 4-1. Cono de Abrams y mesa calibrada



Además de estos dos parámetros se realizará el índice visual de estabilidad [23]. Es un valor cuantitativo/cualitativo de mucha utilidad y que califica el grado de retención de la mezcla a la exudación de la pasta y lechada.

Así, se clasifican los hormigones en función del índice de estabilidad visual IEV de la siguiente forma:

- Un índice menor o igual a 0 indica que no hay segregación ni lechada bordeando el hormigón resultante final del ensayo de extensión de flujo
- Un índice de 0.5 indica que no hay mortero desprendido de la pasta pero que hay una pequeña evidencia de segregación o de burbujas de aire en la superficie.
- Un índice de 1 indica que no hay segregación en la masa de hormigón, pero que existen evidencias de pequeño asentamiento o de burbujas de aire.
- Un índice de 1.5 indica que ya empieza a parecer una pequeña banda de mortero alrededor de la masa de hormigón.
- Un índice de 2 indica que esta banda de mortero puede llegar a estar en el orden de 10 mm.
- Un índice de 3 indica una evidencia de segregación y la banda de mortero alrededor de la masa total del hormigón puede superar los 10 mm.

A pesar del aspecto cualitativo del ensayo, se suele manejar como una evidencia para definir el límite de los hormigones autocompactantes. Normalmente un hormigón que tuviese un índice superior a 3 no sería considerado autocompactante, y estando entre 2 y 3 requeriría ajustes en la dosificación. Por ello, es necesario que en este ensayo se obtengan valores del índice IEV iguales o inferiores a 1.5.

HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE 9 PA·S Y 40 MPA

El ensayo del cono Abrams nos permite en todos los hormigones, como se ha dicho anteriormente, ajustar la dosificación de superplastificante requerido para conseguir que sean autocompactantes.

En esta mezcla, como en casi todas, se tuvo que aumentar la cantidad de superplastificante previsto, en un 50%, para que rellene los moldes sin necesidad de vibrar el hormigón.

HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE 9 PA·S Y 60 MPA

El hormigón de 60 MPa sin fibras de acero se realizó con la dosificación indicada cumpliendo con la calidad de autocompactante sin tener que rectificar la cantidad de superplastificante.

HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE 9 PA·S Y 80 MPA

En esta dosificación se tuvo que aumentar también en un 50% su contenido en superplastificante para que fluyera hasta el rango estipulado sin que la lechada adelante a los áridos, disparando el valor del IEV.

HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO 60 PA·S Y 40 MPA

El ensayo del cono de asentamiento nos proporcionó la siguiente información:

- t_{500} : 9 segundos.
- Diámetro máximo de expansión: menor de 650 mm
- IEV: 0

Ante estos resultados, repetimos el ensayo añadiendo un 50% más del contenido en superplastificante pero el IEV aumentó y se superó el límite de 750 mm, así sabemos que entre lo previsto y el 150% estará la cantidad ideal.

Ilustración 4-2. Fotografías del ensayo de hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero 60 Pa·s y 40 MPa



HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO 60 PA·S Y 60 MPA

En este hormigón el comportamiento fue inesperadamente sensible a la adición de superplastificante por lo que la adición del 38% más de lo previsto resultó fatal para el hormigón añadiendo en la dosificación final se echará siempre por debajo del 25% de lo previsto.

HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO 60 PA·S Y 80 MPA

El ensayo del cono de asentamiento nos proporcionó la siguiente información:

- t_{500} : 3,22 segundos.
- Diámetro máximo de expansión: 704 mm
- IEV: 0

Ilustración 4-3. Fotografías del ensayo de hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero 60 Pa·s y 80 MPa



4.2 Ensayo para obtener la resistencia a compresión

Para obtener la resistencia a compresión del hormigón se ensayan probetas cúbicas de 100 x 100 mm. La resistencia teórica se obtiene con la fórmula anteriormente descrita, poniendo de manifiesto como parámetro básico la relación agua-cemento, sin embargo los resultados experimentales nos harán cuestionarnos si únicamente con una relación agua-cemento baja se consiguen hormigones de resistencias superiores a 50 MPa.

Estos ensayos se han realizado tanto para las probetas de hormigón autocompactante como para aquellos reforzados con fibras. El comportamiento del hormigón nos permite realizar las pruebas a 7, 28 y 90, aunque a partir del 28 la resistencia no aumenta significativamente, por tanto hemos realizado estos ensayos a partir de 28 días sin llegar a los 50. Todas las probetas estuvieron en un baño de agua desde el desencofrado hasta el momento del ensayo.

En el caso de los hormigones autocompactantes sin fibras utilizamos también cortes de probetas prismáticas, también de tamaño 100 x 100 mm para caracterizar mejor el hormigón, teniendo así un muestreo más amplio.

Es necesario recordar que el objetivo de este Trabajo es validar y comprobar el método en las condiciones y con los materiales disponibles, es por ello que se verá a continuación que al realizar y analizar los ensayos los resultados pueden diferir del objetivo definido por el procedimiento adoptado.

El ensayo, realizado en el programa PCD2K, se diseña con una velocidad de precarga de 0,2 mm/s hasta alcanzar 29,4 KN. Se puede colocar o no un plato superior para tratar de uniformizar el asiento de la probeta, en la parte inferior siempre se ha usado un plato rectangular para proteger a la máquina del contacto con la muestra

HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE 9 PA·S Y 40 MPa

Para esta dosificación se han realizado 4 probetas cúbicas y además 3 realizadas a partir de probetas prismáticas, con los siguientes resultados:

AML_CUB_40_1

Tensión de rotura: 53,0812 MPa

Tiempo de curado: 41 días

Ilustración 4-4. Ensayo a compresión AML_CUB_40_1



AML CUB 40 2

Tensión de rotura: 47,4067 MPa

Tiempo de curado: 41 días

Ilustración 4-5. Ensayo a compresión AML_CUB_40_2

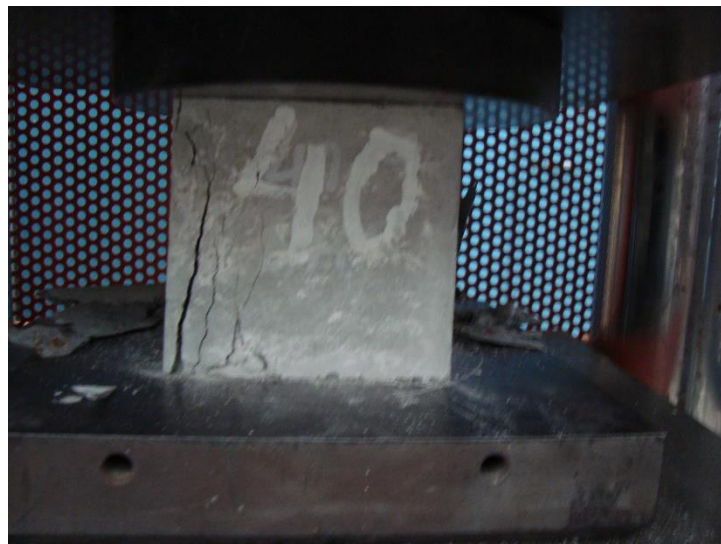


AML CUB 40 3

Tensión de rotura: 41,1756 MPa

Tiempo de curado: 41 días

Ilustración 4-6. Ensayo a compresión AML_CUB_40_3



AML CUB 40 4

Tensión de rotura: 39,1913 MPa

Tiempo de curado: 41 días

Ilustración 4-7. Ensayo a compresión AML_CUB_40_4



AML CCUB 40 1

Tensión de rotura: 51,9229 MPa

Tiempo de curado: 43 días

Ilustración 4-8. Ensayo a compresión AML_CCUB_40_1



AML CCUB 40 2

Tensión de rotura: 43,8153 MPa

Tiempo de curado: 43 días

Ilustración 4-9. Ensayo a compresión AML_CCUB_40_2



AML CCUB 40 3

El ensayo de esta probeta, realizado como las anteriores, dio una tensión de rotura de 30.9131 MPa sin embargo se rompió localmente luego los resultados recogidos no fueron incluidos en el análisis experimental.

Ilustración 4-10. Ensayo a compresión AML_CCUB_40_3



Tabla 4-1. Resumen de valores de ensayo a compresión del hormigón autocompactante de 40MPa

Muestra	Fecha de hormigonado	Fecha estimada de ensayo	Fecha real de ensayo	fc (MPa)
AML_CUB_40_1	15/06/2016	13/07/2016	26/07/2016	53,0812
AML_CUB_40_2	15/06/2016	13/07/2016	26/07/2016	47,4067
AML_CUB_40_3	15/06/2016	13/07/2016	26/07/2016	41,1756
AML_CUB_40_4	15/06/2016	13/07/2016	26/07/2016	39,1913
AML_CCUB_40_1	15/06/2016	13/07/2016	28/07/2016	51,9229
AML_CCUB_40_2	15/06/2016	13/07/2016	28/07/2016	43,8153
AML_CCUB_40_3	15/06/2016	13/07/2016	failed	30,9131 (LOCAL)

La media de los resultados de estos ensayos, sin contar con el de la muestra AML_CCUB_40_3, es de una resistencia de 46,10 MPa con una desviación típica relativa del 12,33%.

Como se observa, solo hay una muestra por debajo de los 40 MPa objetivo, que además en [1] se recomendaba reducir la relación agua-cemento al 92% de la teórica, luego los materiales y dosificación utilizada en las condiciones del laboratorio hacen que la resistencia en dosificaciones con alta relación agua-cemento sea mayor que la esperada.

HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE 9 PA·S Y 60 MPa

Para esta dosificación se han realizado 4 probetas cúbicas y además 3 realizadas a partir de probetas prismáticas, sin embargo las siguientes dieron resultados y presentaron un comportamiento cualitativamente inaceptable para realizar un análisis experimental y obtener una resistencia media de los ensayos:

- AML_CUB_60_1
- AML_CUB_60_4

A continuación se muestran los resultados de los ensayos.

AML_CUB_60_1

Tensión de rotura: 37,4226 MPa

Tiempo de curado: 41 días

Ilustración 4-11. Ensayo a compresión AML_CUB_60_1

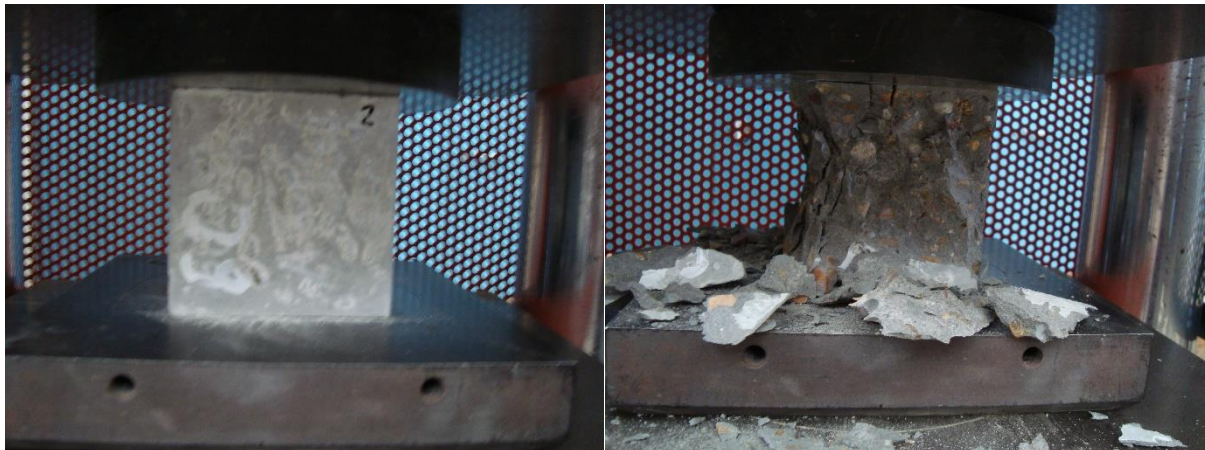


AML_CUB_60_2

Tensión de rotura: 61,6557 MPa

Tiempo de curado: 41 días

Ilustración 4-12. Ensayo a compresión AML_CUB_60_2



AML CUB 60 3

Tensión de rotura: 45,0633 MPa

Tiempo de curado: 41 días

Ilustración 4-13. Ensayo a compresión AML_CUB_60_3



AML CUB 60 4

Tensión de rotura: 40,4932 MPa

Tiempo de curado: 41 días

Ilustración 4-14. Ensayo a compresión AML_CUB_60_4

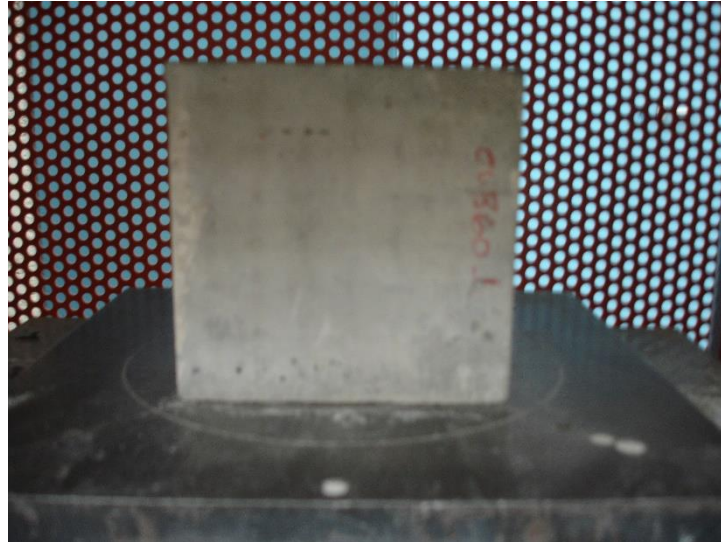


AML CCUB 60 1

Tensión de rotura: 53,9162 MPa

Tiempo de curado: 43 días

Ilustración 4-15. Ensayo a compresión AML_CCUB_60_1



AML CCUB 60 2

Tensión de rotura: 52,4796 MPa

Tiempo de curado: 43 días

Ilustración 4-16. Ensayo a compresión AML_CCUB_60_2



AML_CCUB_60_3

Tensión de rotura: 52,6492 MPa

Tiempo de curado: 43 días

Ilustración 4-17. Ensayo a compresión AML_CCUB_60_3



Tabla 4-2. Resumen de valores de ensayo a compresión del hormigón autocompactante de 60MPa

Muestra	Fecha de hormigonado	Fecha estimada de ensayo	Fecha real de ensayo	fc (MPa)
AML_CUB_60_1	15/06/2016	13/07/2016	26/07/2016	37,4226
AML_CUB_60_2	15/06/2016	13/07/2016	26/07/2016	61,6557
AML_CUB_60_3	15/06/2016	13/07/2016	26/07/2016	45,0633
AML_CUB_60_4	15/06/2016	13/07/2016	26/07/2016	40,4932
AML_CCUB_60_1	15/06/2016	13/07/2016	28/07/2016	53,9162
AML_CCUB_60_2	15/06/2016	13/07/2016	28/07/2016	52,4796
AML_CCUB_60_3	15/06/2016	13/07/2016	28/07/2016	52,6492

La media de los resultados de estos ensayos, sin contar con aquellos especificados anteriormente, es de una resistencia de 53,28 MPa con una desviación típica relativa del 11,07%.

Si se toman todas las muestras, sin hacer un análisis cualitativo, tendríamos un hormigón de 49,1 MPa y una desviación típica relativa de 17,27%. Unos resultados muy alejados de la realidad, como se puede ver las probetas ensayadas que provenían de las prismáticas que tienen una resistencia similar a la media aceptada en el análisis y admitiendo una desviación típica relativa del 11,07 % que nos permiten reproducir la incertidumbre de la resistencia de esta dosificación.

Como se puede observar el objetivo de 60 MPa de resistencia queda lejos de la media aunque en una muestra. AML_CUB_40_2, se alcanza podemos asumir que la resistencia de esta dosificación es de 53 MPa, tal y como lo certifican los resultados de 3 probetas del muestreo.

HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE 9 PA·S Y 80 MPa

Para esta dosificación se han realizado 4 probetas cúbicas y además 3 realizadas a partir de probetas prismáticas, sin embargo la muestra AML CUB 80 1 presentó un resultado y comportamiento muy alejado del rango de las demás, por lo que a la hora de realizar el análisis experimental y obtener una resistencia media de los ensayos se han desechado sus datos.

AML CUB 80 1

Tensión de rotura: 43,106 MPa

Tiempo de curado: 40 días

Ilustración 4-18. Ensayo a compresión AML_CUB_80_1



AML CUB 80 2

Tensión de rotura: 70,1673 MPa

Tiempo de curado: 40 días

Ilustración 4-19. Ensayo a compresión AML_CUB_80_2

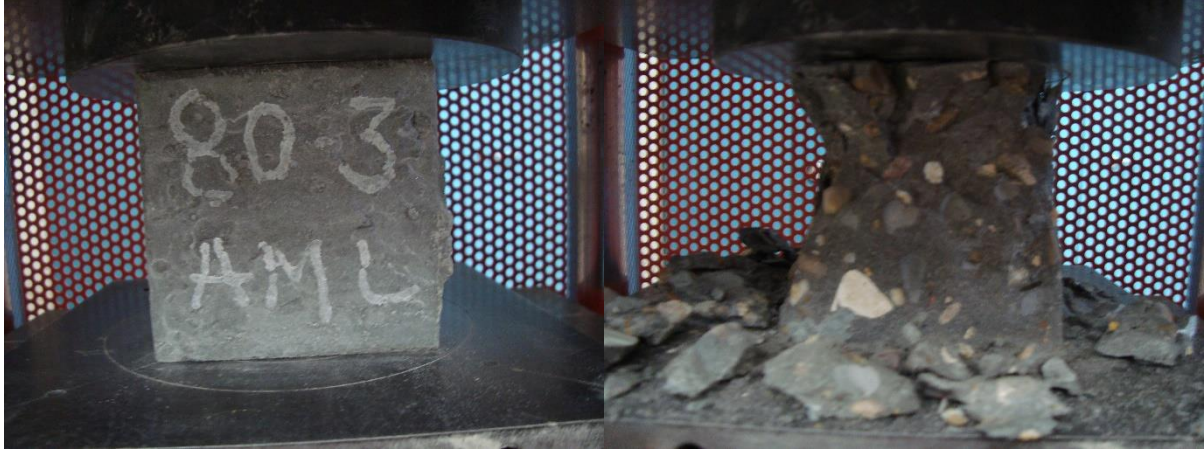


AML CUB 80 3

Tensión de rotura: 62,7241 MPa

Tiempo de curado: 40 días

Ilustración 4-20. Ensayo a compresión AML_CUB_80_3



AML CUB 80 4

Tensión de rotura: 71,2627 MPa

Tiempo de curado: 40 días

AML CCUB 80 1

Tensión de rotura: 60,8745 MPa

Tiempo de curado: 42 días

AML CCUB 80 2

Tensión de rotura: 72,0439 MPa

Tiempo de curado: 42 días

Ilustración 4-21. Ensayo a compresión AML_CCUB_80_2



AML_CCUB_80_3

Tensión de rotura: 58,0912 MPa

Tiempo de curado: 42 días

Ilustración 4-22. Ensayo a compresión AML_CCUB_80_3



Tabla 4-3. Resumen de valores de ensayo a compresión del hormigón autocompactante de 80MPa

Muestra	Fecha de hormigonado	Fecha estimada de ensayo	Fecha real de ensayo	fc (MPa)
AML_CUB_80_1	16/06/2016	14/07/2016	26/07/2016	43,106
AML_CUB_80_2	16/06/2016	14/07/2016	26/07/2016	70,1673
AML_CUB_80_3	16/06/2016	14/07/2016	26/07/2016	62,7241
AML_CUB_80_4	16/06/2016	14/07/2016	26/07/2016	71,2627
AML_CCUB_80_1	16/06/2016	14/07/2016	28/07/2016	60,8745
AML_CCUB_80_2	16/06/2016	14/07/2016	28/07/2016	72,0439
AML_CCUB_80_3	16/06/2016	14/07/2016	28/07/2016	58,0912

La media de los resultados de estos ensayos, sin contar con la muestra AML_CUB_80_1, es de una resistencia de 65,86 MPa con una desviación típica relativa del 9,14%.

Si se toman todas las muestras, sin hacer un análisis cualitativo, tendríamos un hormigón autocompactante de 62,61 MPa y una desviación típica relativa de 16,30%. Unos resultados que no reflejan la realidad, como se puede ver en el resto de las probetas que se mueven en un intervalo entre 60 y 70 MPa de resistencia y además se reduce la desviación típica relativa hasta el 9,14% que nos permiten reproducir la incertidumbre de la resistencia de esta dosificación.

Como se puede observar el objetivo de 80 MPa de resistencia queda lejos de la siendo la mayor resistencia obtenida de 72 MPa, un 10% menos que el objetivo por lo que se analizarán las causas de por qué esta dosificación, aún cumpliendo matemáticamente el método y las recomendaciones de la EFNARC no se acerca a lo previsto.

HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO 60 PA·S Y 40 MPa

Para esta dosificación se han realizado 4 probetas cúbicas de 100 x 100 mm:

AML_CUB_40F_1

Tensión de rotura: 39,5056 MPa

Tiempo de curado: 42 días

Ilustración 4-23. Ensayo a compresión AML_CUB_40F_1



AML_CUB_40F_2

Tensión de rotura: 45,4763 MPa

Tiempo de curado: 42 días

Ilustración 4-24. Ensayo a compresión AML_CUB_40F_2



AML_CUB_40F_3

Tensión de rotura: 42,4685 MPa

Tiempo de curado: 42 días

Ilustración 4-25. Ensayo a compresión AML_CUB_40F_3



AML_CUB_40F_4

Tensión de rotura: 38,9669 MPa

Tiempo de curado: 42 días

Ilustración 4-26. Ensayo a compresión AML_CUB_40F_4



Tabla 4-4. Resumen de valores de ensayo a compresión del hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero de 40MPa

Muestra	Fecha de hormigonado	Fecha estimada de ensayo	Fecha real de ensayo	fc (MPa)
AML_CUB_40F_1	26/07/2016	23/08/2016	06/09/2016	39,5056
AML_CUB_40F_2	26/07/2016	23/08/2016	06/09/2016	45,4763
AML_CUB_40F_3	26/07/2016	23/08/2016	06/09/2016	42,4685
AML_CUB_40F_4	26/07/2016	23/08/2016	06/09/2016	38,9669

La media de los resultados de estos ensayos, de las 4 muestras, es de una resistencia a compresión de 41,60 MPa con una desviación típica relativa del 7,22%.

Como se observa, solo hay dos muestras levemente por debajo de la resistencia objetivo de 40 MPa, por lo que la resistencia a compresión con fibras no se ve alterada significativamente. Además, al igual que la amasada sin reforzar, no se ha reducido la relación agua-cemento por lo que se mejora el comportamiento previsto inicialmente a compresión en este tipo de hormigones, obteniendo también una desviación típica baja por lo que esta dosificación está bastante bien ajusta a lo que se quiere conseguir, con los materiales y condiciones en las que se ha hormigonado.

HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO 60 PA·S Y 60 MPa

Para esta dosificación se han realizado 4 probetas cúbicas de 100 x 100 mm. Sin embargo, la muestra AML_CUB_60F_4 presentó un resultado y comportamiento muy alejado del rango de las demás, por lo que a la hora de realizar el análisis experimental y obtener una resistencia media de los ensayos se han desechado sus datos.

AML_CUB_60F_1

Tensión de rotura: 50,199 MPa

Tiempo de curado: 42 días

Ilustración 4-27. Ensayo a compresión AML_CUB_60F_1



AML_CUB_60F_2

Tensión de rotura: 51,6446 MPa

Tiempo de curado: 42 días

Ilustración 4-28. Ensayo a compresión AML_CUB_60F_2



AML_CUB_60F_3

Tensión de rotura: 61,0361 MPa

Tiempo de curado: 42 días

Ilustración 4-29. Ensayo a compresión AML_CUB_60F_3



AML_CUB_60F_4

Tensión de rotura: 36,5517 MPa

Tiempo de curado: 42 días

Ilustración 4-30. Ensayo a compresión AML_CUB_60F_4



Tabla 4-5. Resumen de valores de ensayo a compresión del hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero de 60MPa

Muestra	Fecha de hormigonado	Fecha estimada de ensayo	Fecha real de ensayo	fc (MPa)
AML_CUB_60F_1	26/07/2016	23/08/2016	06/09/2016	50,199
AML_CUB_60F_2	26/07/2016	23/08/2016	06/09/2016	51,6446
AML_CUB_60F_3	26/07/2016	23/08/2016	06/09/2016	61,0361
AML_CUB_60F_4	26/07/2016	23/08/2016	06/09/2016	36,5517

La media de los resultados de estos ensayos, de las 3 muestras, desechando el valor de AML_CUB_60F_4, es de una resistencia a compresión de 54,29 MPa con una desviación típica relativa del 10,84%.

Es reseñable que tal y como ocurría con el hormigón sin fibras, la resistencia media no llega al objetivo pero se establece entorno a los 55 MPa, alcanzado una muestra los 60 MPa a compresión. Por último se ha de añadir que no tomar los datos de la muestra 4 permiten caracterizar mejor el comportamiento a compresión ya que contando esta muestra se tendría un hormigón de un valor algo más bajo, de 49,86 MPa de resistencia pero una desviación típica relativa inaceptable del 20,33%.

HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO 60 PA·S Y 80 MPa

Para esta dosificación se han realizado 4 probetas cúbicas de 100 x 100 mm. Sin embargo, la muestra AML_CUB_80F_4 rompió repentinamente, a baja carga y en poco espacio de tiempo por lo que se entiende que hubo algún problema a la hora de realizar el ensayo en el grupo de presión que hizo aumentar la carga a una velocidad mayor de la que se estipula.

AML_CUB_80F_1

Tensión de rotura: 56,8791 MPa

Tiempo de curado: 42 días

Ilustración 4-31. Ensayo a compresión AML_CUB_80F_1



AML_CUB_80F_2

Tensión de rotura: 53,3775 MPa

Tiempo de curado: 42 días

Ilustración 4-32. Ensayo a compresión AML_CUB_80F_2



AML_CUB_80F_3

Tensión de rotura: 56,6816 MPa

Tiempo de curado: 42 días

Ilustración 4-33. Ensayo a compresión AML_CUB_80F_3



AML_CUB_80F_4

Tensión de rotura: 37,7727 MPa, ensayo fallido

Tiempo de curado: 42 días

Ilustración 4-34. Ensayo a compresión AML_CUB_80F_4



Tabla 4-6. Resumen de valores de ensayo a compresión del hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero de 80MPa

Muestra	Fecha de hormigonado	Fecha estimada de ensayo	Fecha real de ensayo	fc (MPa)
AML_CUB_80F_1	26/07/2016	23/08/2016	06/09/2016	56,8791
AML_CUB_80F_2	26/07/2016	23/08/2016	06/09/2016	53,3775
AML_CUB_80F_3	26/07/2016	23/08/2016	06/09/2016	56,6816
AML_CUB_80F_4	26/07/2016	23/08/2016	06/09/2016	37,7727 (FALLO)

La media de los resultados de estos ensayos, de las 3 muestras, desechando el valor de AML_CUB_80F_4, es de una resistencia a compresión de 55,67 MPa con una desviación típica relativa del 3,54%.

Los resultados de este hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero son muy distantes de los valores que se querían obtener, dejándonos unos valores a compresión similares a la dosificación objetivo de 60 MPa, por lo que el comportamiento y el hormigón a altas resistencias con los materiales utilizados no cumplen las expectativas deseadas.

4.3 Ensayo para obtener el modulo elástico

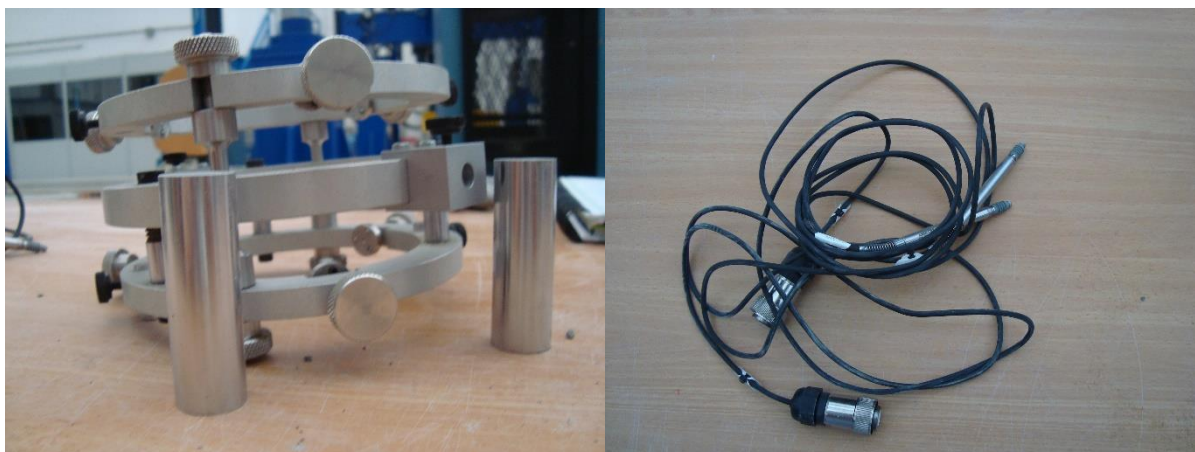
Para determinar el módulo secante de elasticidad en compresión del hormigón se ha seguido la norma UNE-EN 12390-13 [26]. El módulo secante de elasticidad estabilizado es la pendiente de la secante de la curva tensión-deformación tras 3 ciclos de carga.

Las probetas de ensayo utilizadas son de 200 mm de altura y 100 mm de diámetro, aunque las probetas de hormigón sin fibras de acero fueron recortadas 5 milímetros para mejorar el asiento.

Los instrumentos de medida de la deformación se deben colocar de tal forma que la base de medición sea equidistante con los extremos de la probeta. La probeta debe estar centrada en el plato inferior.

Para medir se han utilizado 2 transductores lvdt colocados en extremos opuestos de 3 anillos de acero rígidos que circundan a la probeta cilíndrica. Estos elementos miden desplazamientos que después serán pasados los datos a deformaciones, para comprobar la veracidad de este método se han colocado bandas extensiométricas en 3 probetas de hormigón autocompactante sin fibras que nos aportan microdeformaciones en 3 probetas, una de cada dosificación.

Ilustración 4-35. Anillos y transductores lvdt utilizados



Para realizar este ensayo según la norma se necesita la resistencia a compresión (medida o estimada) que es empleada para definir los niveles de tensión para la determinación del módulo secante de elasticidad.

El método empleado será el B donde se aplican tres ciclos de carga y se calcula en el tercero. Se coloca la probeta de ensayo centrada en la máquina de ensayo, con los instrumentos de medición colocados axialmente. Se aplica la tensión de precarga σ_p . Se mantiene la tensión de precarga durante un periodo de tiempo no superior a 20 segundos, en estos ensayos hemos tomado 15 segundos.

Primer ciclo

Se incrementa la tensión aplicada a la probeta a una velocidad de $(0,6 \pm 0,2)$ MPa/s desde la tensión de precarga hasta la tensión superior σ_a . Se mantiene la tensión superior durante un periodo de tiempo no superior a 20 segundos, también se han establecido 15 segundos. Al final de este periodo se registra la deformación a lo largo de cada línea de medición y se calcula la deformación media, $\epsilon_{a,1}$.

Se disminuye la tensión a una velocidad de $(0,6 \pm 0,2)$ MPa/s hasta la tensión de precarga y se mantiene la tensión de precarga durante un periodo de tiempo no superior a 20 segundos, otra vez se han fijado 15 segundos. Al final de este periodo se registra la deformación a lo largo de cada línea de medición y se calcula la deformación media, $\epsilon_{p,1}$.

Segundo ciclo

Se incrementa la tensión a una velocidad de $(0,6 \pm 0,2)$ MPa/s desde la tensión de precarga hasta la tensión superior σ_a . Se mantiene la tensión superior durante un periodo de tiempo no superior a 20 segundos, también se han establecido 15 segundos. Al final de este periodo se registra la deformación a lo largo de cada línea de medición y se calcula la deformación media, $\epsilon_{a,2}$.

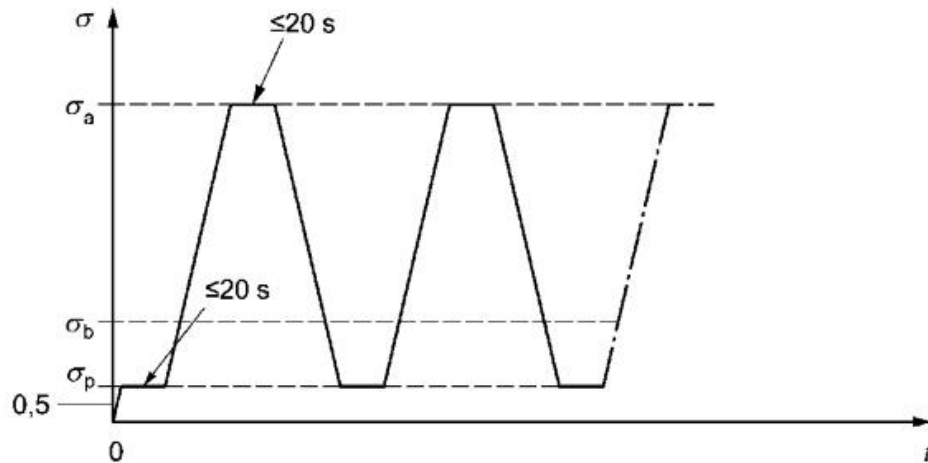
Se disminuye la tensión a una velocidad de $(0,6 \pm 0,2)$ MPa/s hasta la tensión de precarga y se mantiene la tensión de precarga durante un periodo de tiempo no superior a 20 segundos, otra vez se han fijado 15 segundos. Al final de este periodo se registra la deformación a lo largo de cada línea de medición y se calcula la deformación media, $\epsilon_{p,2}$.

Tercer ciclo

Se incrementa la tensión a una velocidad de $(0,6 \pm 0,2)$ MPa/s desde la tensión de precarga hasta la tensión superior σ_a . Se mantiene la tensión superior durante un periodo de tiempo no superior a 20 segundos, también se han establecido 15 segundos. Al final de este periodo se registra la deformación a lo largo de cada línea de medición y se calcula la deformación media, $\epsilon_{a,2}$.

Se disminuye la tensión a una velocidad de $(0,6 \pm 0,2)$ MPa/s hasta la tensión de precarga y se mantiene la tensión de precarga durante un periodo de tiempo no superior a 20 segundos, otra vez se han fijado 15 segundos. Al final de este periodo se registra la deformación a lo largo de cada línea de medición y se calcula la deformación media, $\epsilon_{p,2}$.

Ilustración 4-36. Ciclos para la determinación del módulo secante de elasticidad estabilizado (Método B)



Leyenda	
	ciclos de carga
	ciclo de carga para la determinación del módulo secante de elasticidad estabilizado – Método B
σ	Tensión aplicada en MPa
σ_a	Tensión superior – $f_c / 3$
σ_b	Tensión inferior – $0,10 \times f_c \leq \sigma_b \leq 0,15 \times f_c$
σ_p	Tensión de precarga – $0,5 \text{ MPa} \leq \sigma_p \leq \sigma_b$
t	Tiempo en s

Siendo el módulo:

$$E_{C,S} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_S} = \frac{\sigma_a - \sigma_p}{\varepsilon_{a,3} - \varepsilon_{p,2}}$$

El valor de la resistencia a compresión de los ciclos de carga se ha tomado como la media de las probetas cúbicas sin tener en cuenta los cortes de las probetas prismáticas en el caso de la amasada con resistencia objetivo de 40 MPa, sin embargo en las otras amasadas, tanto con fibras como sin fibras, se ha tomado como valor de la resistencia el mayor valor de entre todas las probetas cúbicas dado que no llegaban al objetivo se ha tomado esa decisión.

Hay que indicar que el valor de σ_p se ha tomado como 0,05 el valor de la resistencia a compresión adoptada.

La máquina utilizada controla el ensayo en fuerza por lo que, conociendo las dimensiones de la probeta, se pueden hallar los máximos y mínimos de los ciclos de carga

Para uniformizar el asiento del cilindro en el plato superior se ha colocado un neopreno, utilizado como apoyo en puentes, que contiene varias placas de acero que aumentan su rigidez.

En el análisis experimental se ha utilizado el programa Origin para tratar los resultados y obtener el módulo. De todas las probetas se obtienen las gráficas de:

- Carga-tiempo.
- Pendiente del último ciclo de carga, del cual se obtiene el valor que se quiere hallar.

Como hay dos trazadores se obtiene el desplazamiento realizando la media de ambos, exceptuando aquellos datos en los cuales uno de ellos sea erróneo, en ese caso se tomará solo el valor del acorde a la realidad. A partir del desplazamiento y sabiendo el diámetro del anillo (100 mm, igual que la probeta) y la altura (un tercio de la altura de la probeta) se conocen también las deformaciones que nos interesan para hallar el módulo de Young.

HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE 9 PA·S Y 40 MPA

Se han realizado 3 probetas cilíndricas y se han ensayado con los siguientes valores de tensiones en los ciclos:

- $f_c=45,21$ MPa
- $\sigma_a=15,07$ MPa
- $\sigma_p=2,26$ MPa

AML CIL 40 1

El módulo de elasticidad obtenido es de 33769 MPa según el promedio de los trazadores de desplazamiento y de 33350 MPa de acuerdo con las microdeformaciones obtenidas por las bandas extensiométricas.

Ilustración 4-37. Ciclos de carga de AML_CIL_40_1

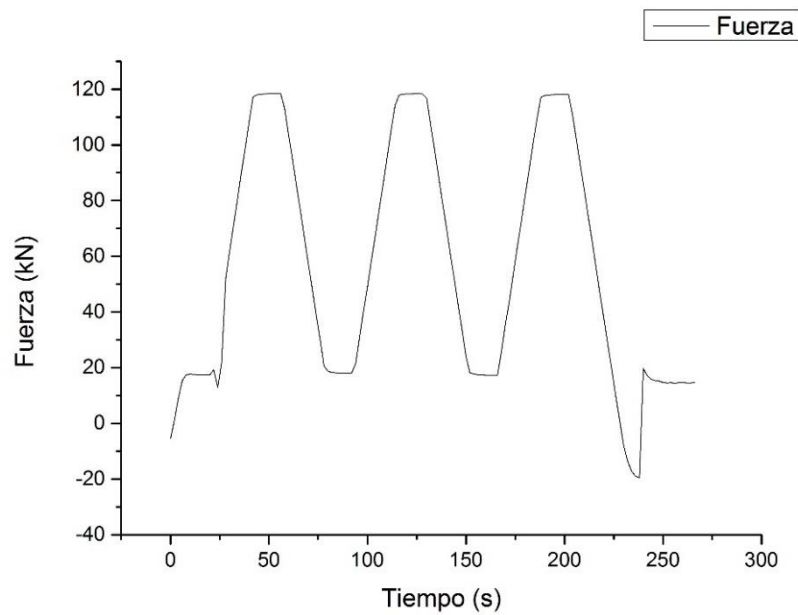


Ilustración 4-38. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_40_1 según el promedio de los trazadores

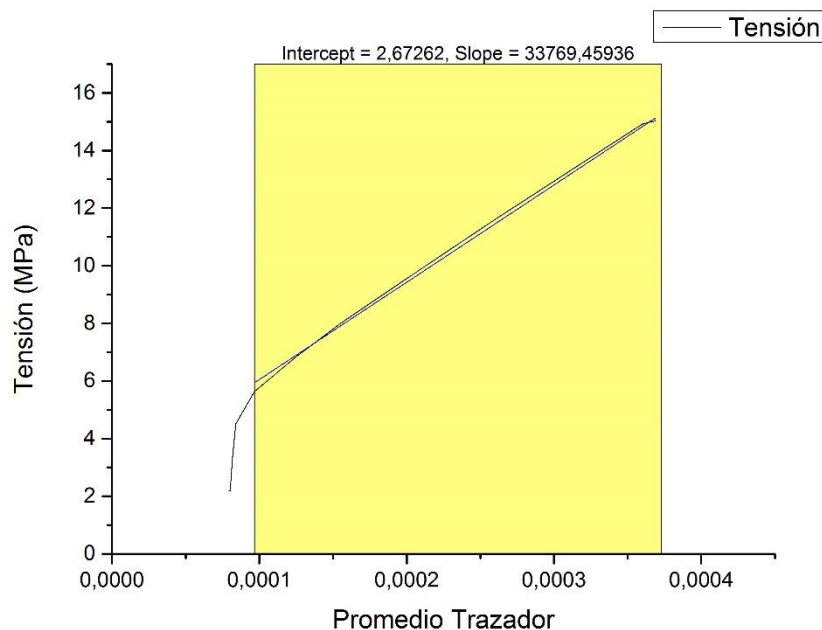
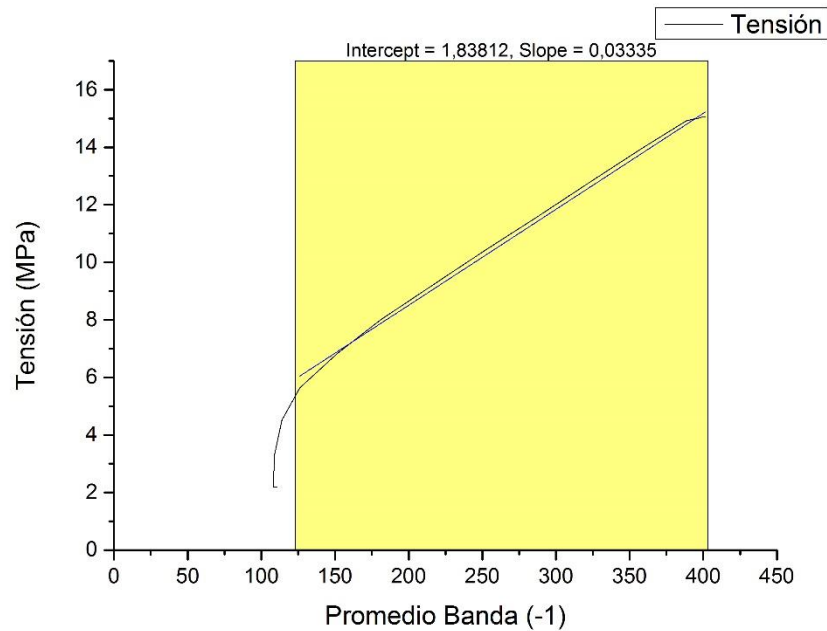


Ilustración 4-39. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_40_1 según las bandas extensiométricas



La relación del resultado de las bandas y de los anillos es del 98,76% por lo que se puede asegurar que tomar los datos a partir de los transductores nos aportará un módulo de Young fiel a la realidad con un método más rápido y sostenible.

AML CIL 40 2

El módulo de elasticidad obtenido es de 35733 MPa según el promedio de los trazadores de desplazamiento.

Ilustración 4-40. Ciclos de carga de AML_CIL_40_2

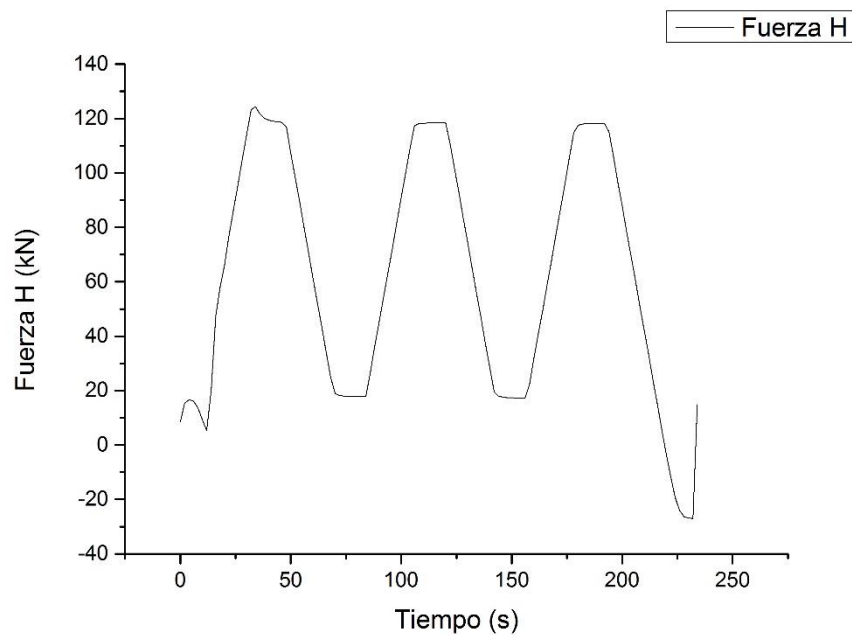
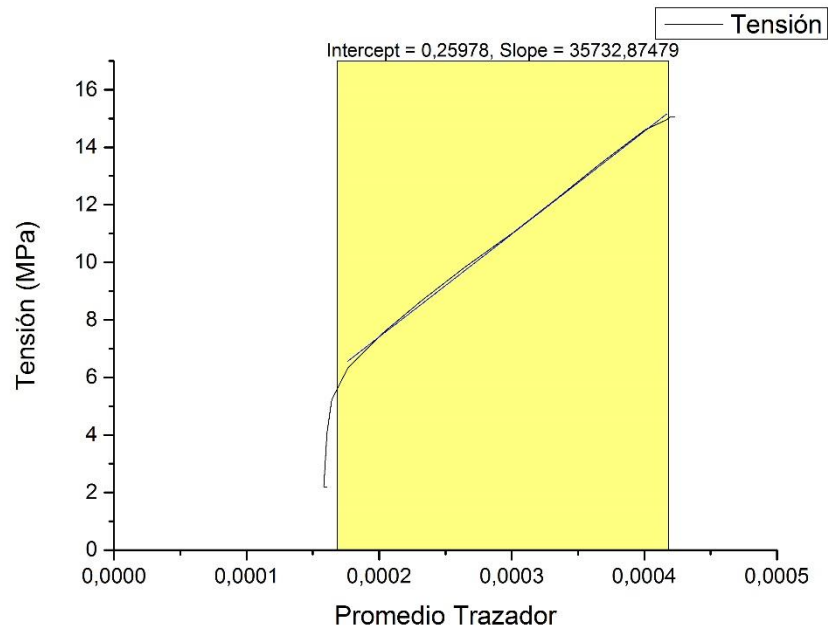


Ilustración 4-41. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_40_2 según el promedio de los trazadores



AML CIL 40 3

El módulo de elasticidad obtenido es de 34447 MPa según el promedio de los trazadores de desplazamiento.

Ilustración 4-42. Ciclos de carga de AML_CIL_40_3

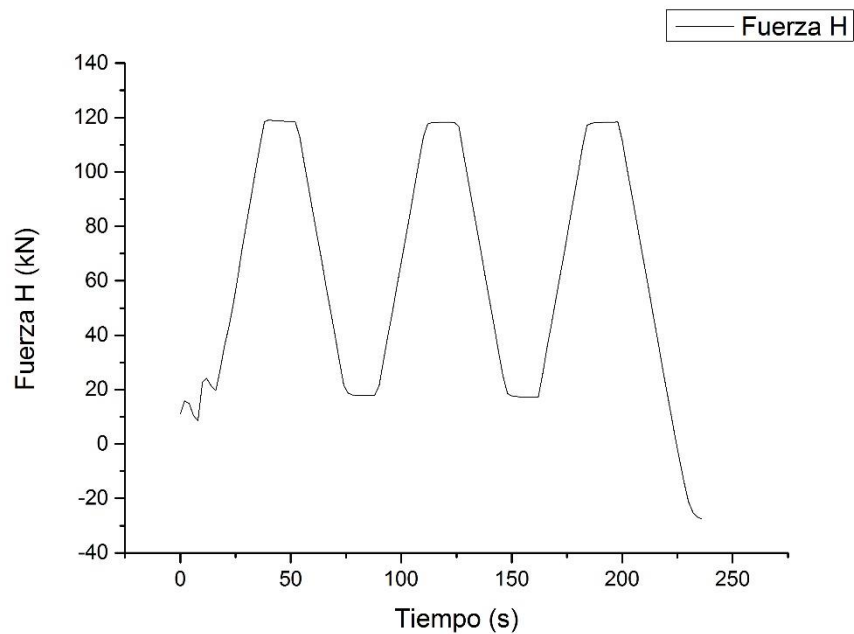


Ilustración 4-43. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_40_3 según el promedio de los trazadores

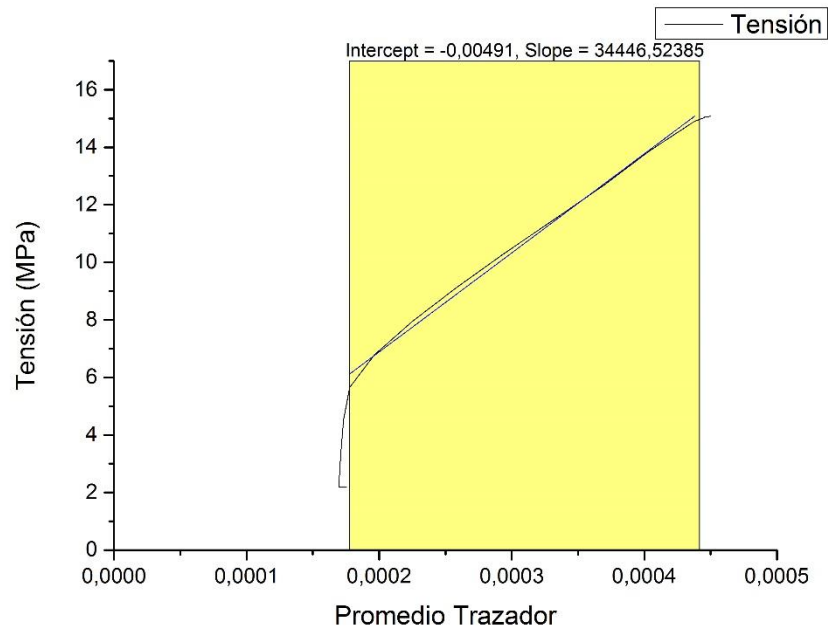


Ilustración 4-44. Fotografía del ensayo de la muestra AML_CIL_40_3



El promedio de los módulos de elasticidad obtenido por los transductores es de 34650 MPa con una desviación típica relativa muy baja, del 2,88% lo que nos indica una dispersión mínima entre las muestras ensayadas.

HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE 9 PA·S Y 60 MPa

Se han realizado 4 probetas cilíndricas y se han ensayado con los siguientes valores de tensiones en los ciclos:

- $f_c=61,5\text{MPa}$
- $\sigma_a=20,5\text{ MPa}$
- $\sigma_p=3,08\text{ MPa}$

AML CIL 60 1

El módulo de elasticidad obtenido es de 19200 MPa según el trazador 2 dado que el 1 no dio resultado y de 18090 MPa de acuerdo con las microdeformaciones obtenidas por las bandas extensiométricas. Como se puede observar este módulo da un valor muy bajo y será desechado posteriormente dado que la probeta se fisuró, pero sirve como calibre ente anillos y bandas.

Ilustración 4-45. Ciclos de carga de AML_CIL_60_1

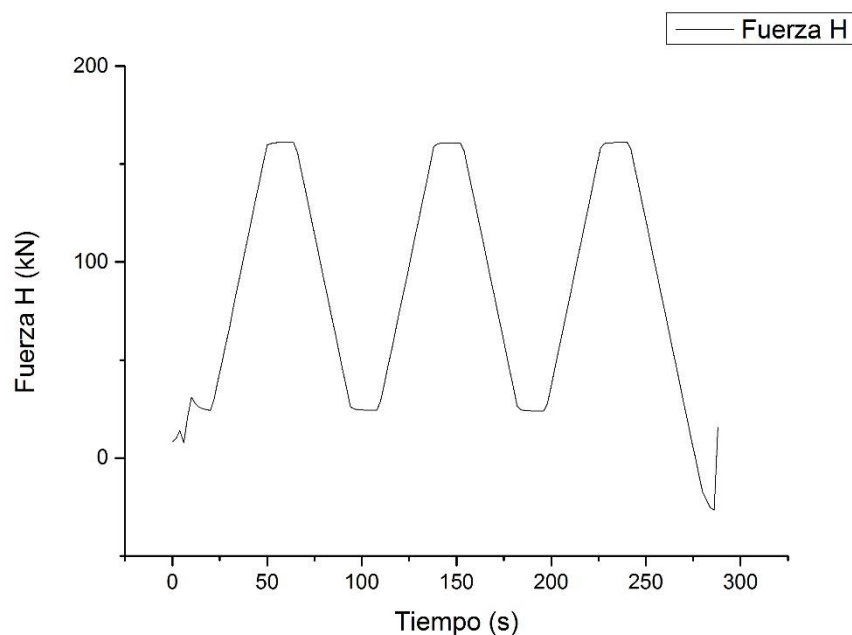


Ilustración 4-46. Fotografía del ensayo de la muestra AML_CIL_60_1



Ilustración 4-47. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_60_1 según el trazador 2

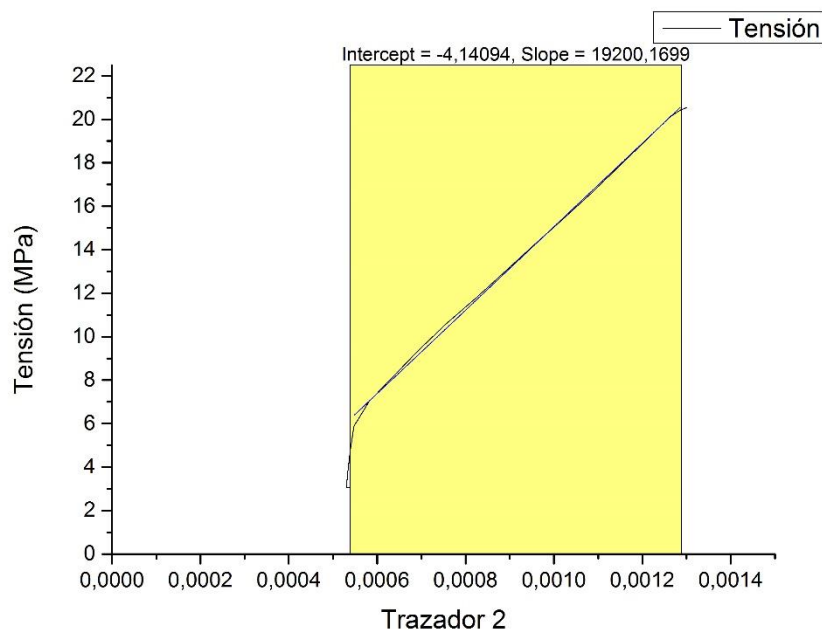
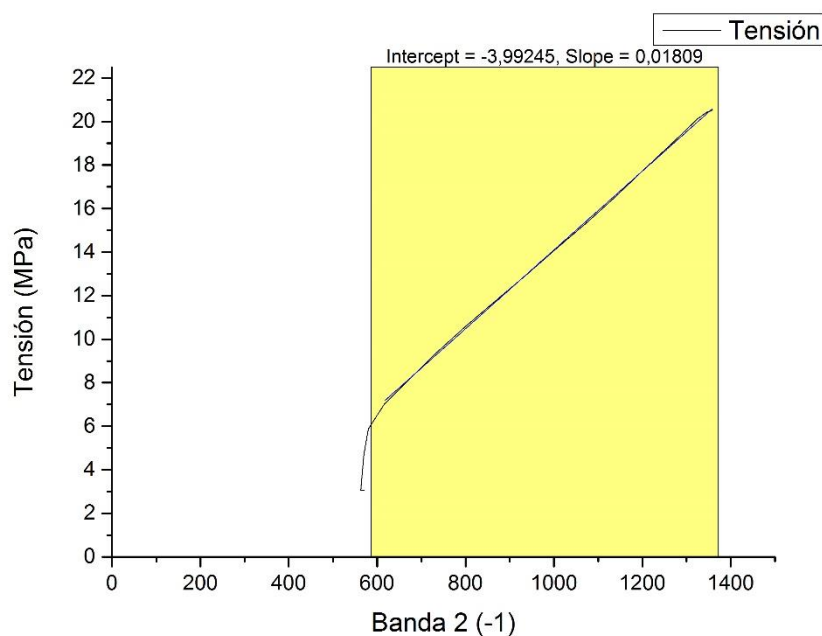


Ilustración 4-48. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_60_1 según las bandas extensiométricas



La relación del resultado, aunque como se ha dicho anteriormente no será relevante en el análisis, de las bandas y de los anillos es del 94,22% por lo que se puede asegurar que tomar los datos a partir de los transductores nos aportará un módulo de Young de gran precisión.

AML CIL 60 2

El módulo de elasticidad obtenido es de 35984 MPa según el promedio de los trazadores de desplazamiento.

Ilustración 4-49. Ciclos de carga de AML_CIL_60_2

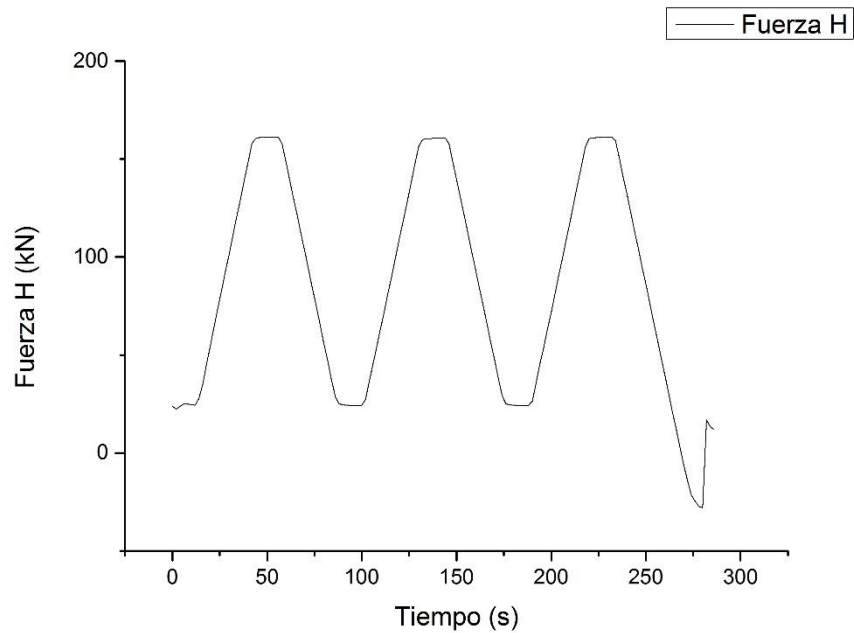


Ilustración 4-50. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_60_2 según el promedio de los trazadores

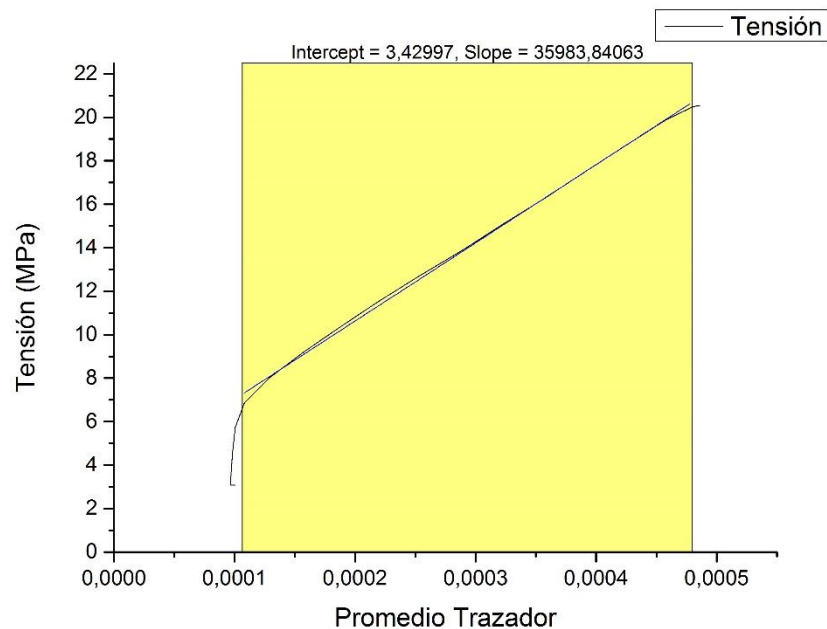
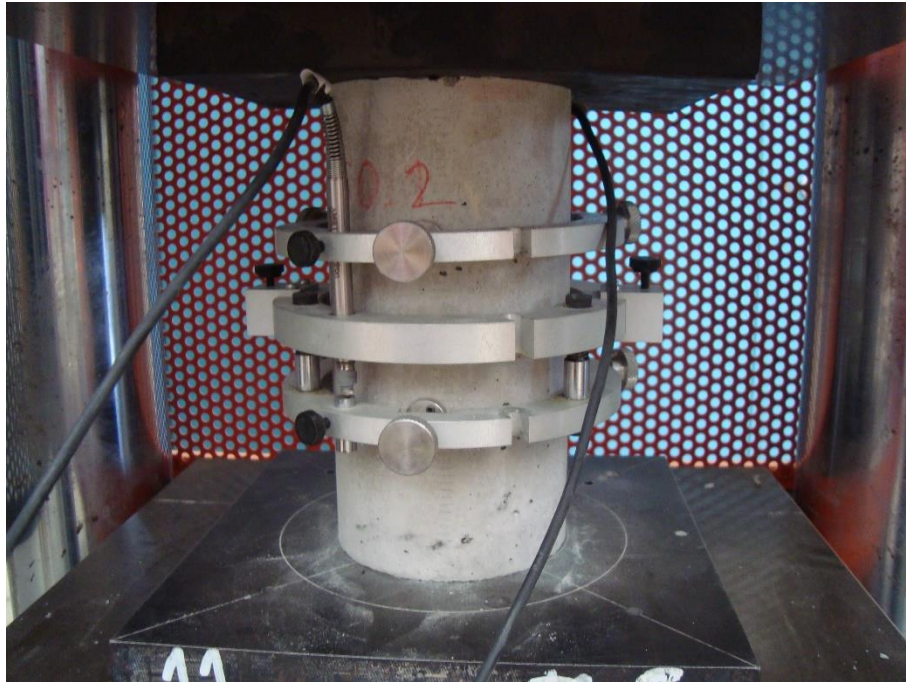


Ilustración 4-51. Fotografía del ensayo de la muestra AML_CIL_60_2



AML CIL 60 3

El módulo de elasticidad obtenido es de 33183 MPa según el promedio de los trazadores de desplazamiento.

Ilustración 4-52. Ciclos de carga de AML_CIL_60_3

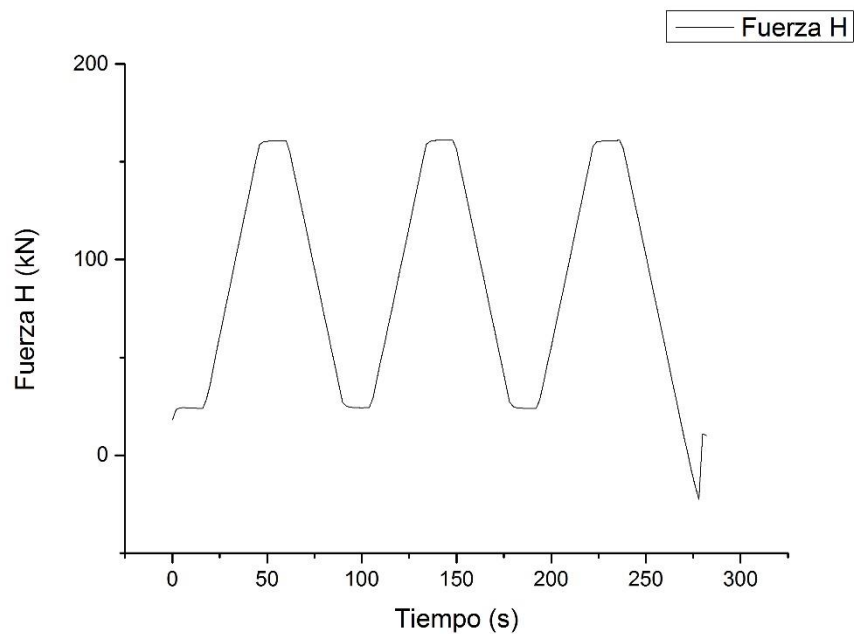


Ilustración 4-53. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_60_3 según el promedio de los trazadores

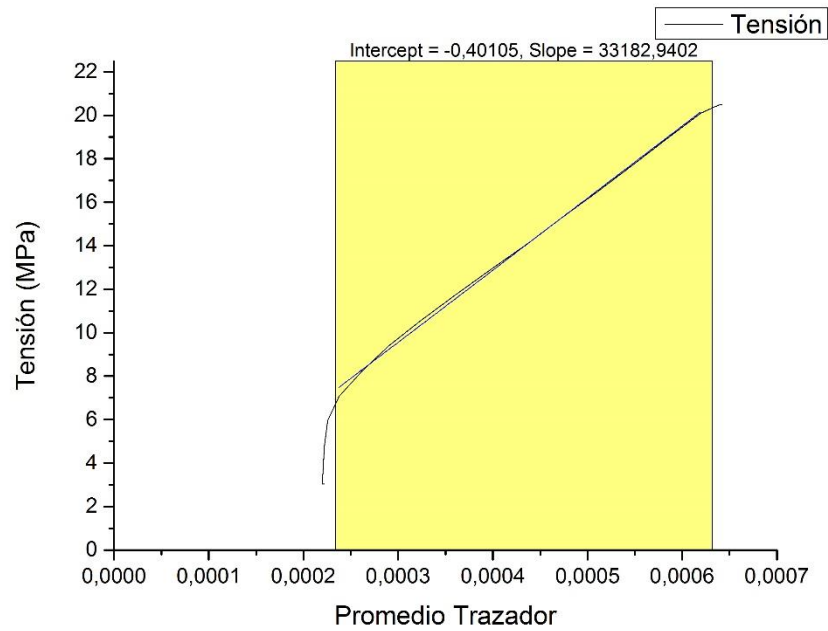


Ilustración 4-54. Fotografía del ensayo de la muestra AML_CIL_60_3



AML CIL 60 4

El módulo de elasticidad obtenido es de 33788 MPa según los datos obtenidos por el trazador 1 ya que el trazador 2 no tomó medidas del desplazamiento.

Ilustración 4-55. Ciclos de carga de AML_CIL_60_4

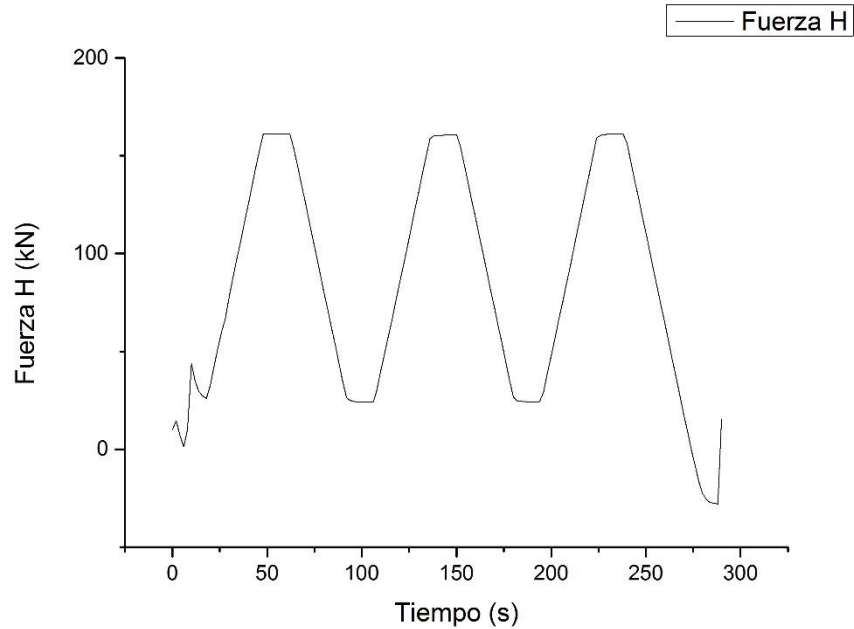


Ilustración 4-56. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_60_4 según el trazador 1

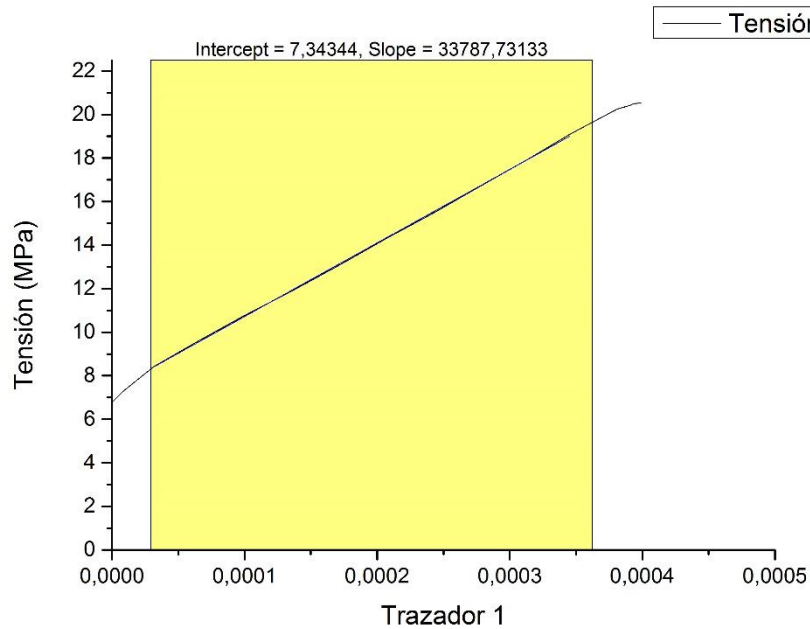
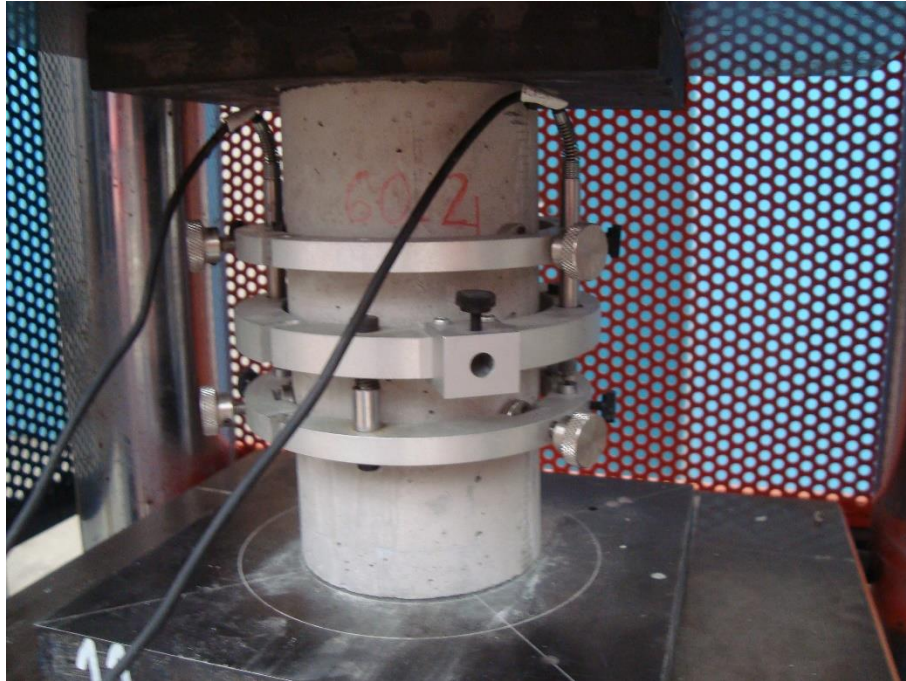


Ilustración 4-57. Fotografía del ensayo de la muestra AML_CIL_60_4



El promedio de los módulos de elasticidad obtenido por los transductores, salvo el de la muestra AML_CIL_60_1, es de 34318 MPa con una desviación típica relativa del 4,29%.

HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE 9 PA·S Y 80 MPa

Se han realizado 4 probetas cilíndricas y se han ensayado con los siguientes valores de tensiones en los ciclos:

- $f_c=71,26$ MPa
- $\sigma_a=23,75$ MPa
- $\sigma_p=3,56$ MPa

AML CIL 80 1

El módulo de elasticidad obtenido es de 38063 MPa según el promedio de los trazadores de desplazamiento.

Ilustración 4-58. Ciclos de carga de AML_CIL_80_1

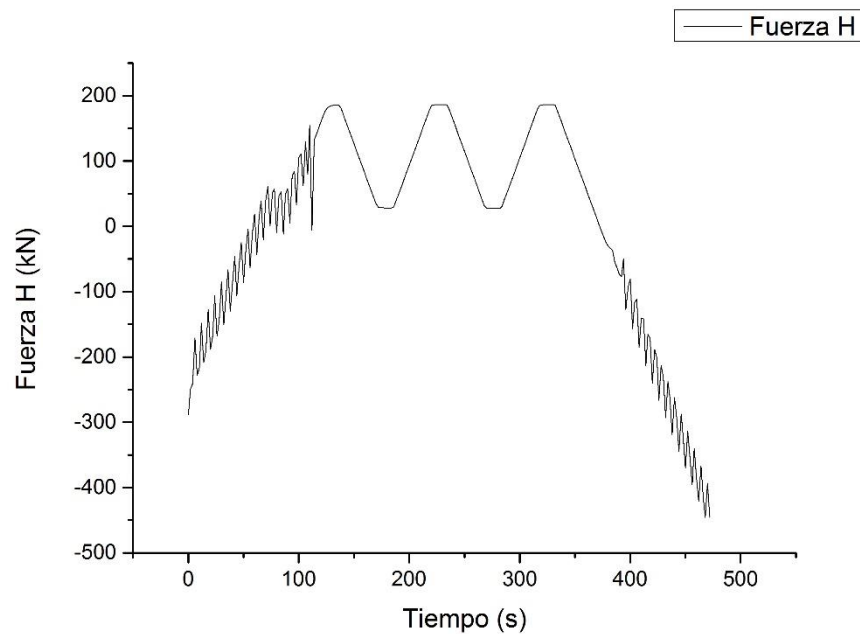


Ilustración 4-59. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_80_1 según el promedio de los trazadores

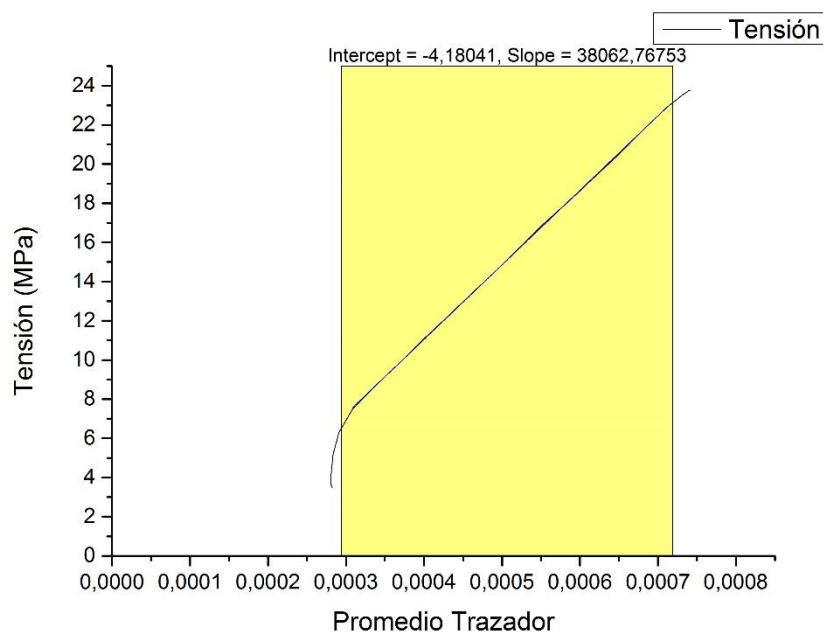
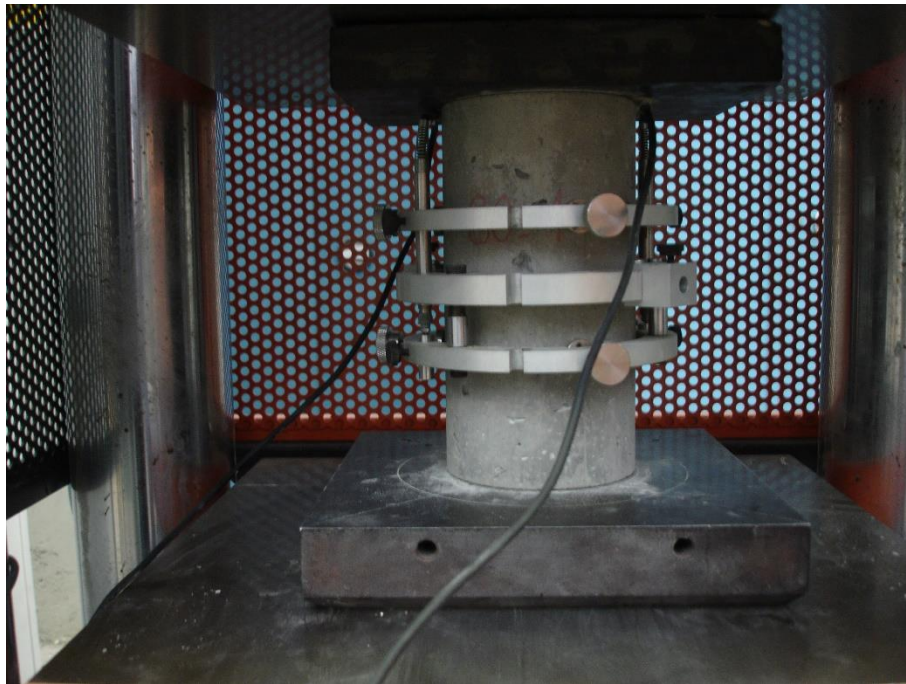


Ilustración 4-60. Fotografía del ensayo de la muestra AML_CIL_80_1



AML CIL 80 2

El módulo de elasticidad obtenido es de 34062 MPa según el promedio de los trazadores de desplazamiento.

Ilustración 4-61. Ciclos de carga de AML_CIL_80_2

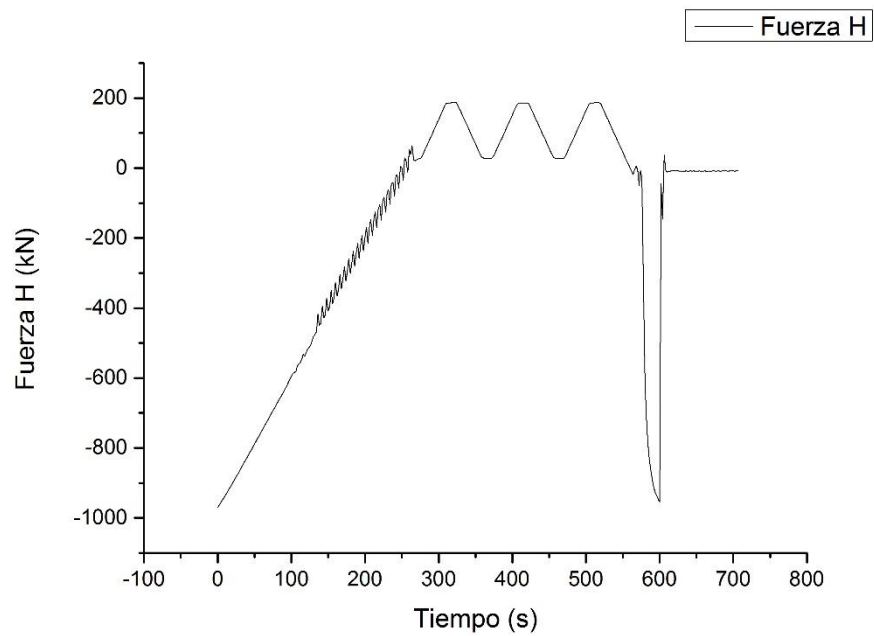


Ilustración 4-62. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_80_2 según el promedio de los trazadores

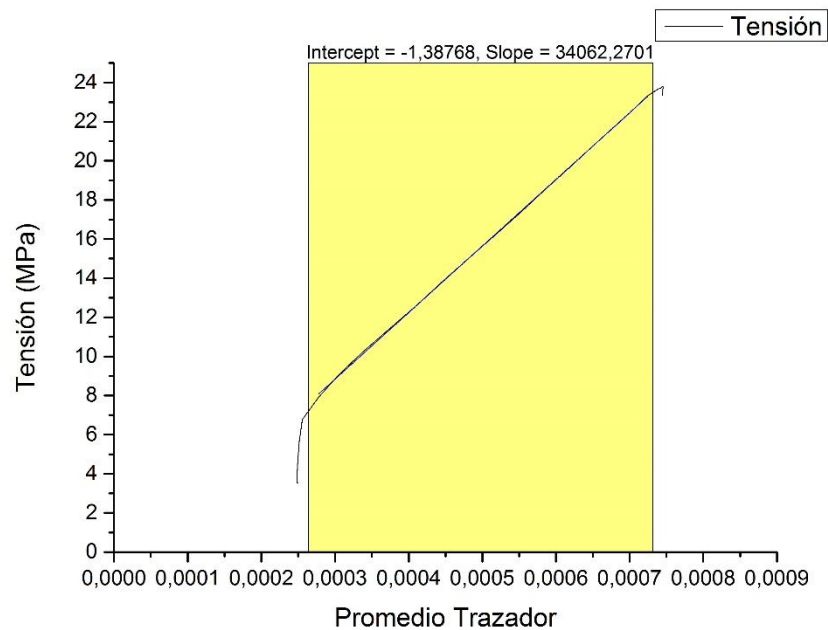
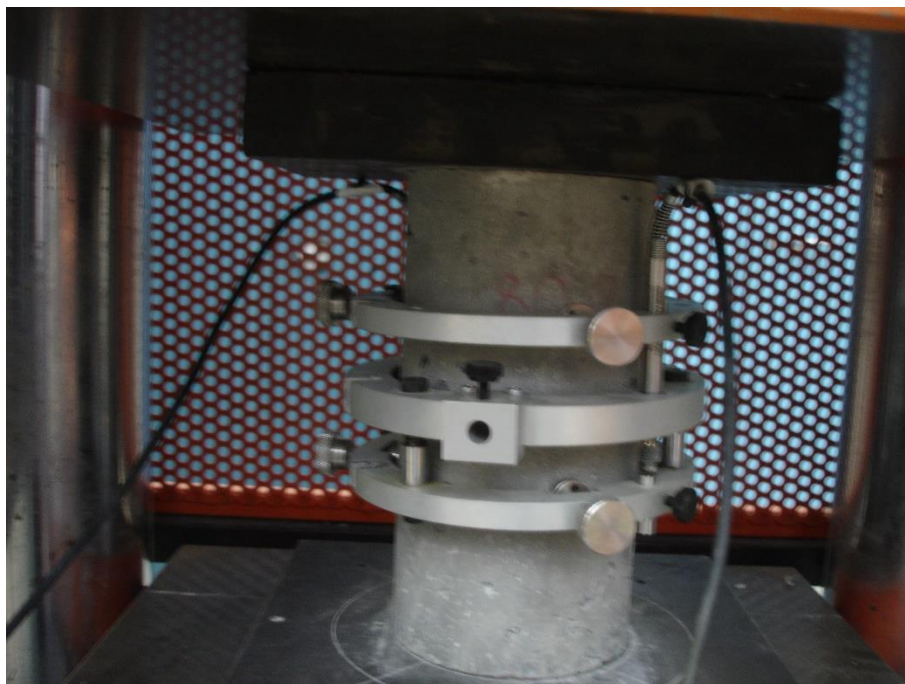


Ilustración 4-63. Fotografía del ensayo de la muestra AML_CIL_80_2



AML CIL 80 3

El módulo de elasticidad obtenido es de 42774 MPa según el promedio de los trazadores de desplazamiento.

Ilustración 4-64. Ciclos de carga de AML_CIL_80_3

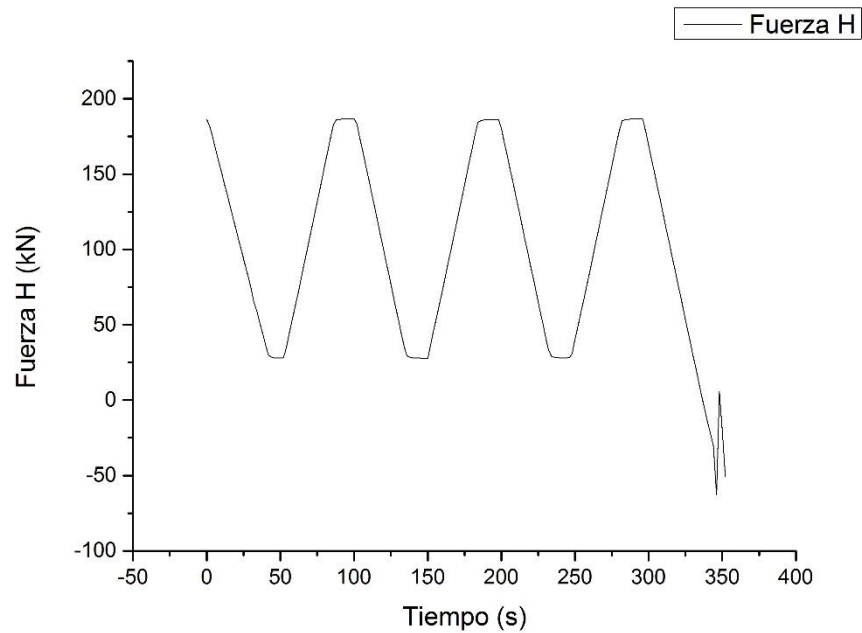


Ilustración 4-65. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_80_3 según el promedio de los trazadores

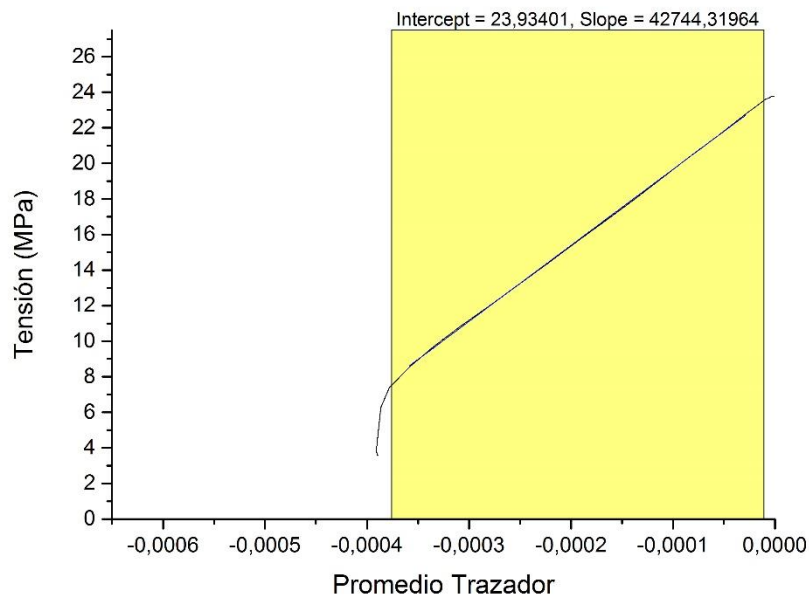
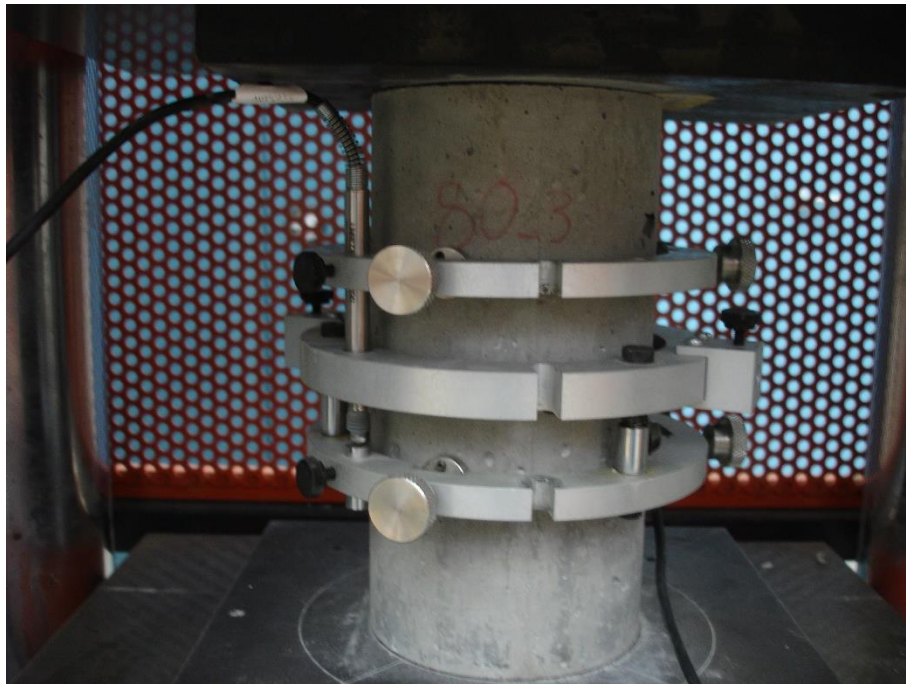


Ilustración 4-66. Fotografía del ensayo de la muestra AML_CIL_80_3



AML CIL 80 4

El módulo de elasticidad obtenido es de 39210 MPa según el promedio de los trazadores y de 39920 MPa de acuerdo con las microdeformaciones obtenidas por las bandas extensiométricas.

Ilustración 4-67. Ciclos de carga de AML_CIL_80_4

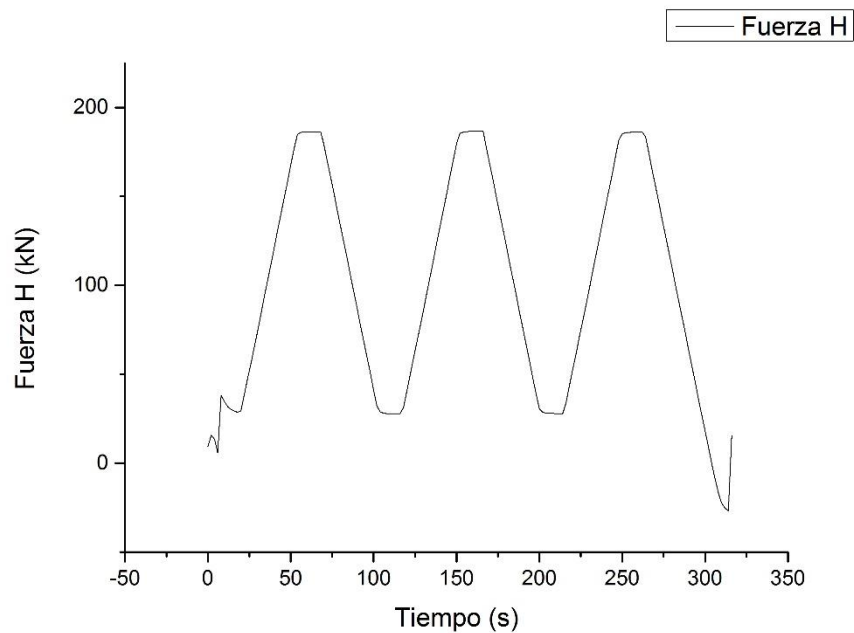


Ilustración 4-68. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_80_4 según el promedio de los trazadores

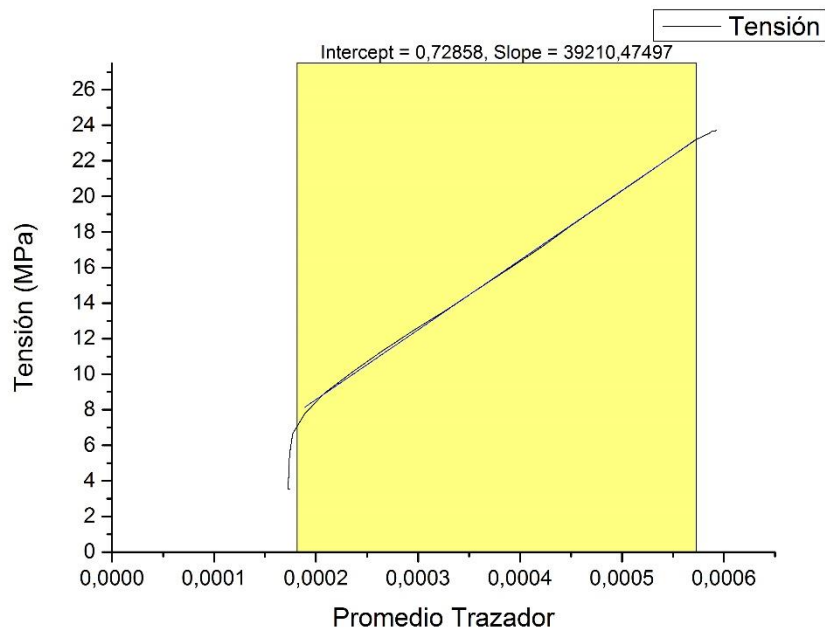


Ilustración 4-69. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_80_4 según las bandas extensiométricas

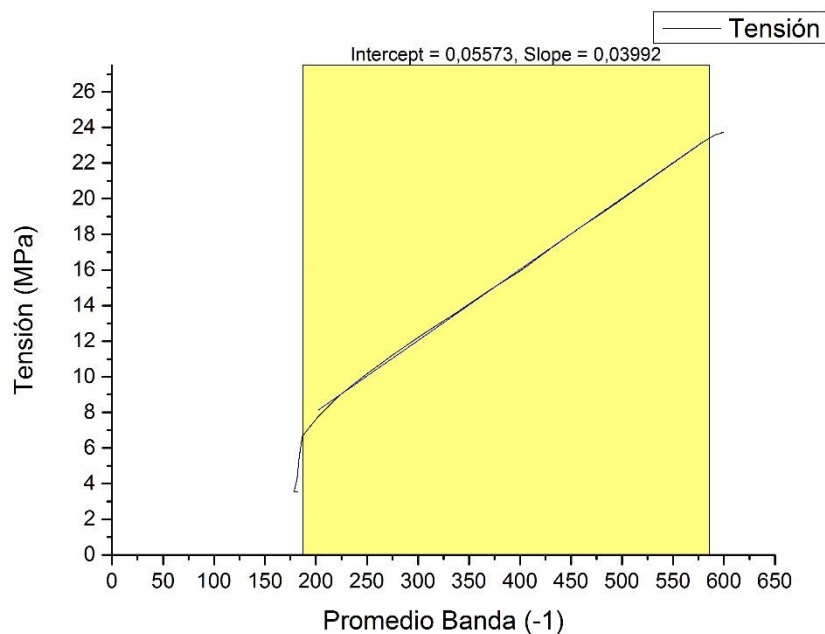
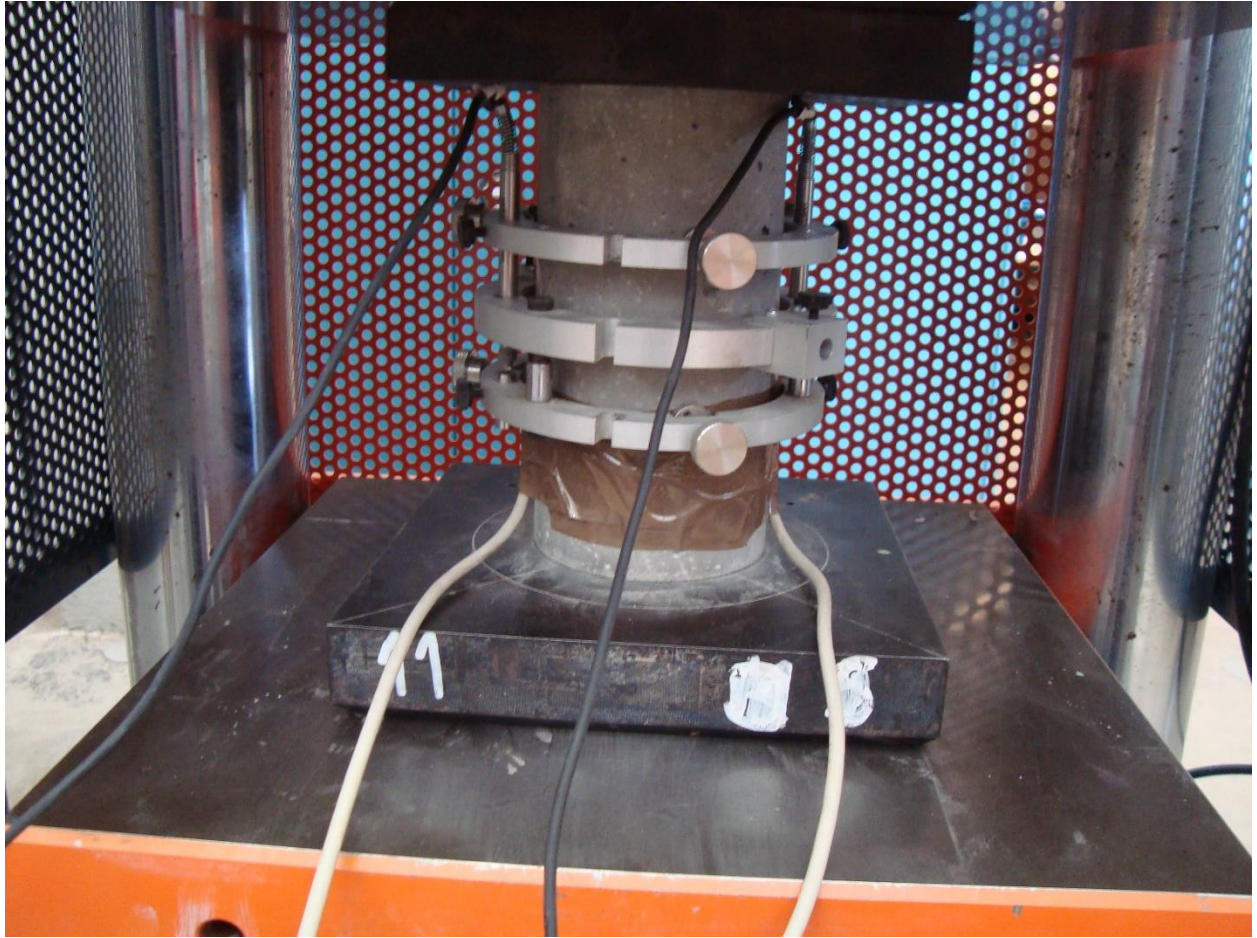


Ilustración 4-70. Fotografía del ensayo de la muestra AML_CIL_80_4



La relación del resultado de las bandas y de los anillos es del 101,81% por lo que se puede asegurar que tomar los datos a partir de los transductores nos aportará un módulo de Young con gran exactitud.

El promedio de los módulos de elasticidad obtenido por los transductores es de 38520 MPa con una desviación típica relativa del 9,29%.

HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO 60 PA·S Y 40 MPA

Se han realizado 3 probetas cilíndricas y se han ensayado con los siguientes valores de tensiones en los ciclos:

- $f_c=41,60$ MPa
- $\sigma_a=13,89$ MPa
- $\sigma_p=2,08$ MPa

AML CIL 40F 1

El módulo de elasticidad obtenido es de 31676 MPa según el promedio de los trazadores de desplazamiento.

Ilustración 4-71. Ciclos de carga de AML_CIL_40F_1

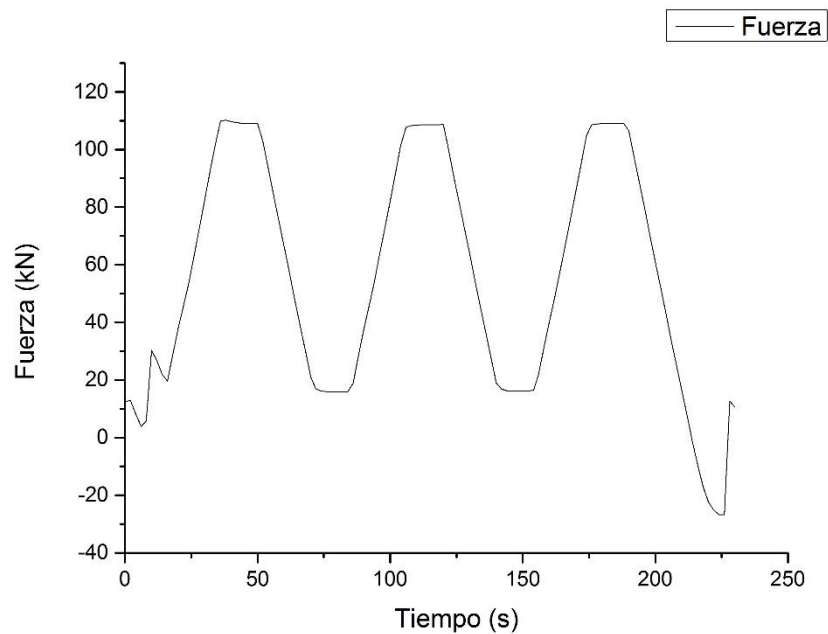


Ilustración 4-72. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_40F_1 según el promedio de los trazadores

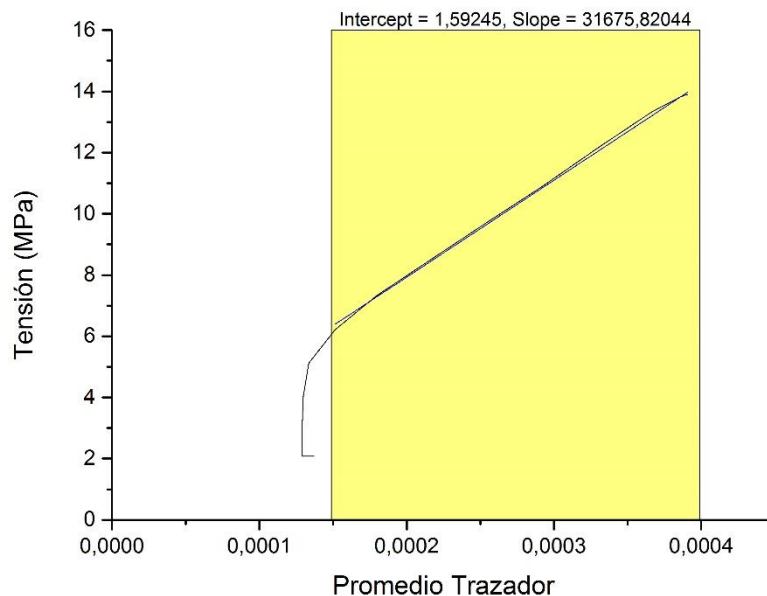


Ilustración 4-73. Fotografía del ensayo de la muestra AML_CIL_40F_1



AML CIL 40F 2

El módulo de elasticidad obtenido es de 39419 MPa según el promedio de los trazadores de desplazamiento.

Ilustración 4-74. Ciclos de carga de AML_CIL_40F_2

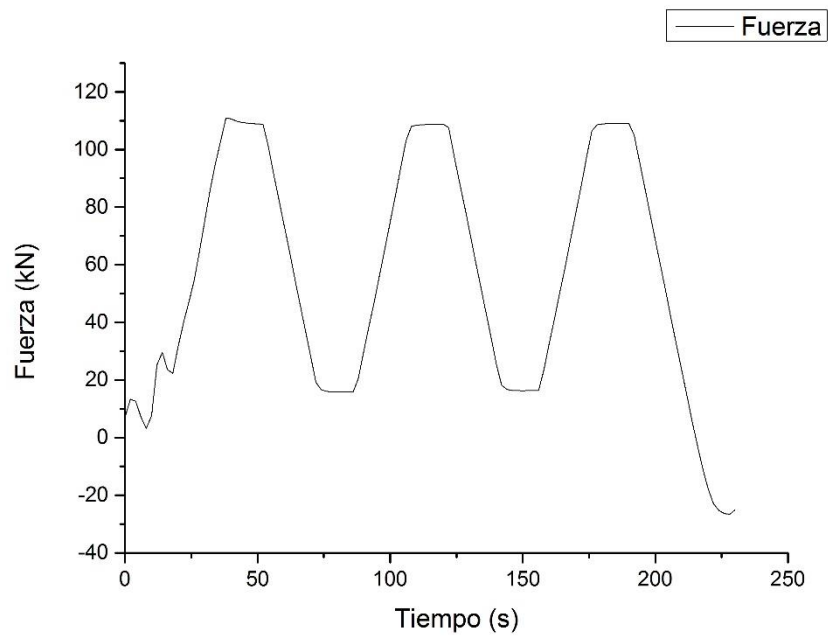


Ilustración 4-75. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_40F_2 según el promedio de los trazadores

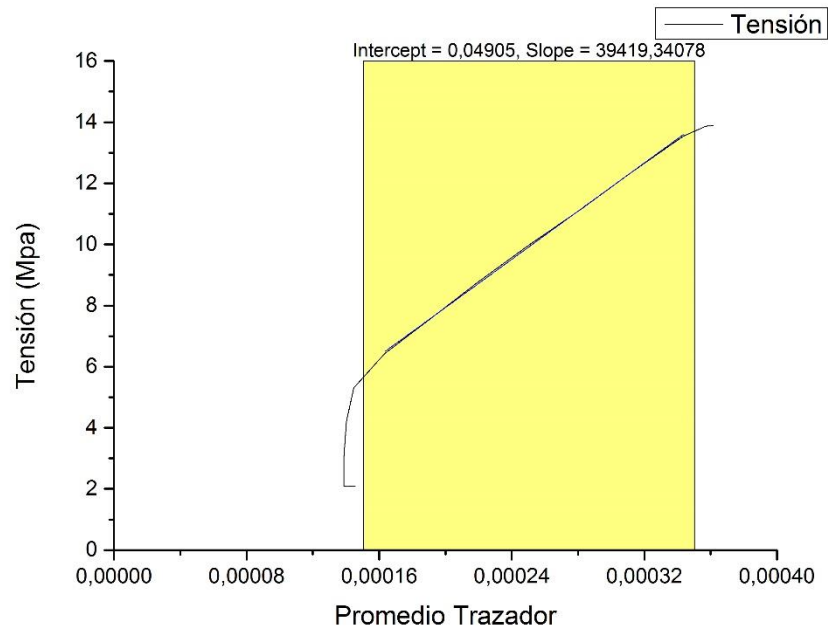


Ilustración 4-76. Fotografía del ensayo de la muestra AML_CIL_40F_2



AML CIL 40F 3

El módulo de elasticidad obtenido es de 41609 MPa según el promedio de los trazadores de desplazamiento.

Ilustración 4-77. Ciclos de carga de AML_CIL_40F_3

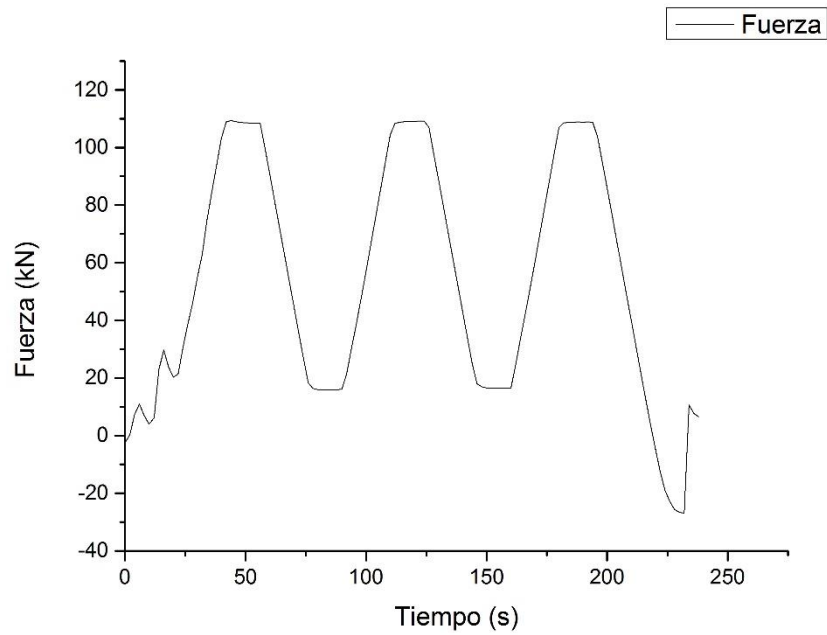


Ilustración 4-78. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_40F_3 según el promedio de los trazadores

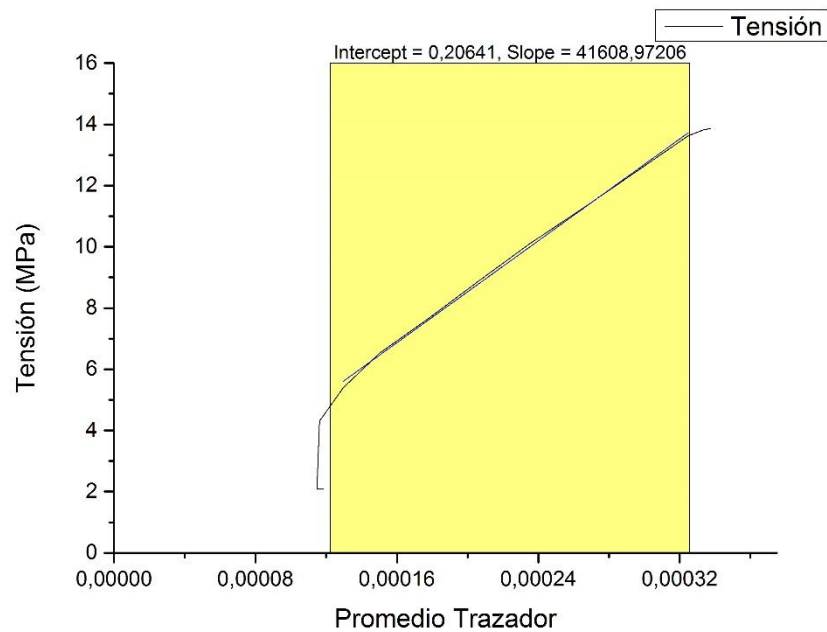


Ilustración 4-79. Fotografía del ensayo de la muestra AML_CIL_40F_3



El promedio de los módulos de elasticidad obtenido por los transductores es de 37568 MPa con una desviación típica relativa del 13,89%.

HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO 60 PA·S Y 60 MPa

Se han realizado 4 probetas cilíndricas y se han ensayado con los siguientes valores de tensiones en los ciclos:

- $f_c=61,04$ MPa
- $\sigma_a=20,30$ MPa
- $\sigma_p=3,04$ MPa

AML CIL 60F 1

El módulo de elasticidad obtenido es de 29686 MPa según el promedio de los trazadores de desplazamiento.

Ilustración 4-80. Ciclos de carga de AML_CIL_60F_1

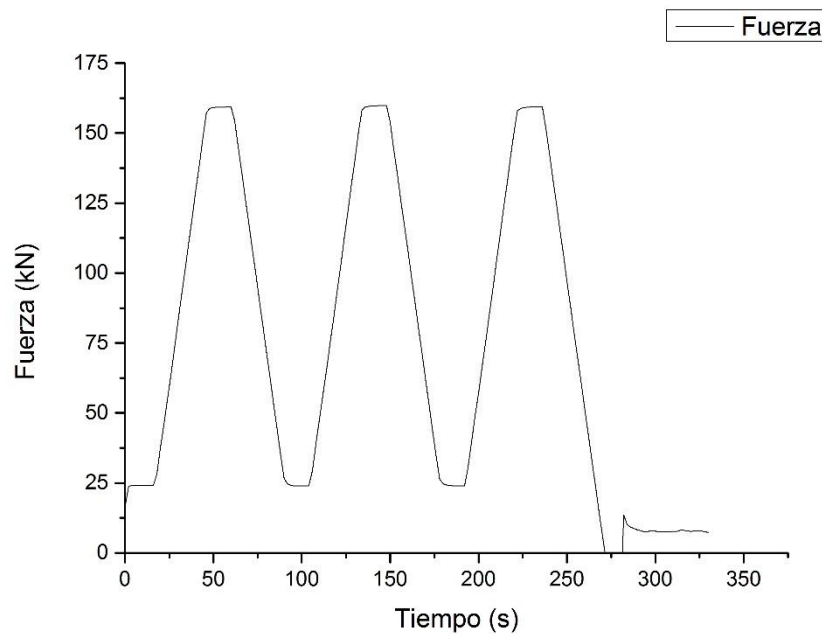


Ilustración 4-81. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_60F_1 según el promedio de los trazadores

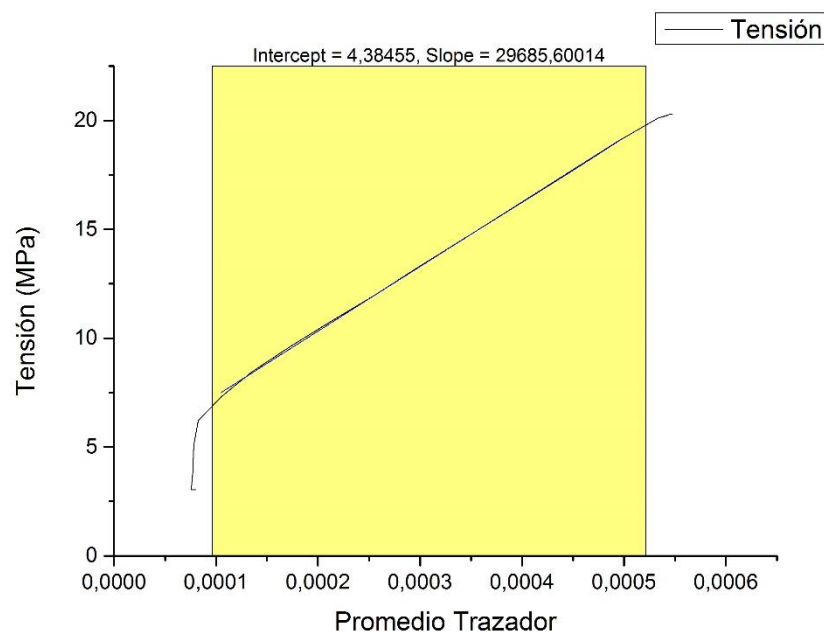


Ilustración 4-82. Fotografía del ensayo de la muestra AML_CIL_60F_1



AML CIL 60F 2

El módulo de elasticidad obtenido es de 38889 MPa según el promedio de los trazadores de desplazamiento.

Ilustración 4-83. Ciclos de carga de AML_CIL_60F_2

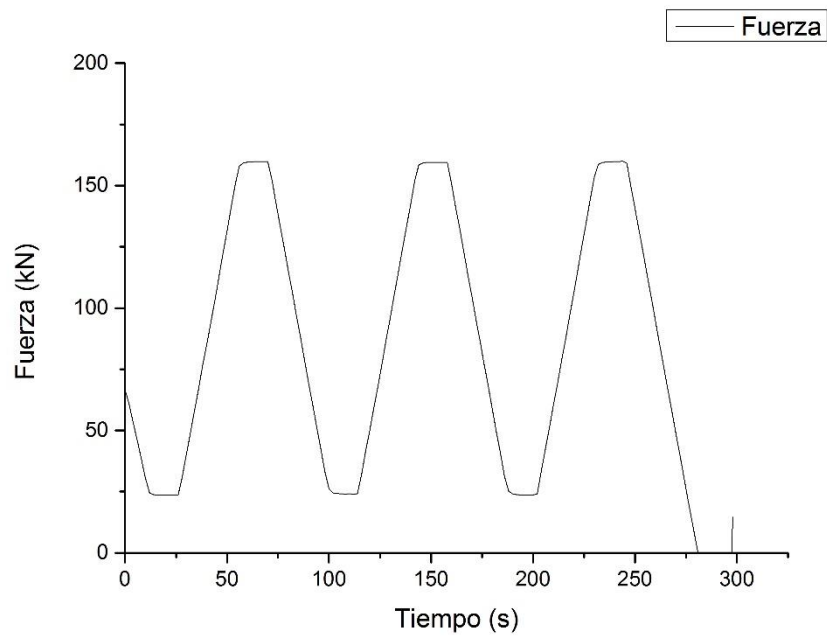


Ilustración 4-84. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_60F_2 según el promedio de los trazadores

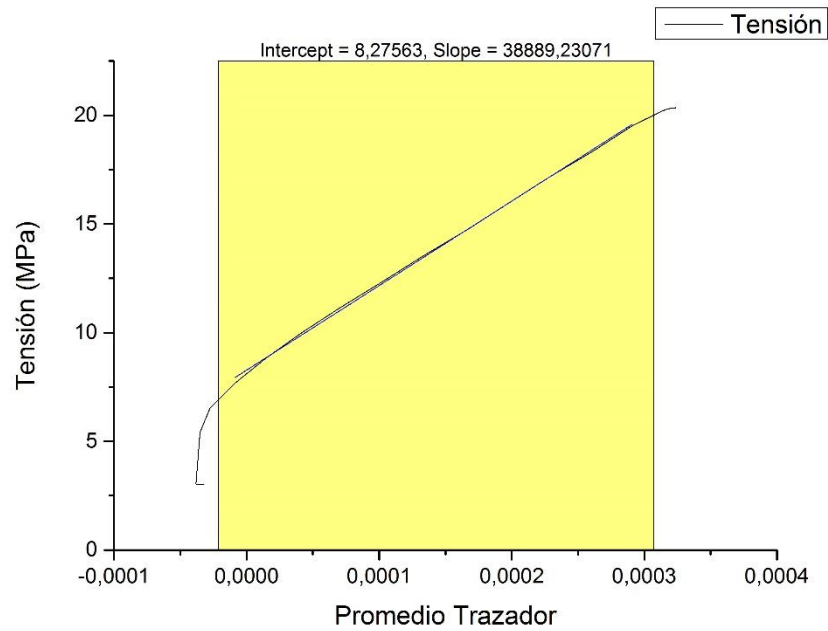
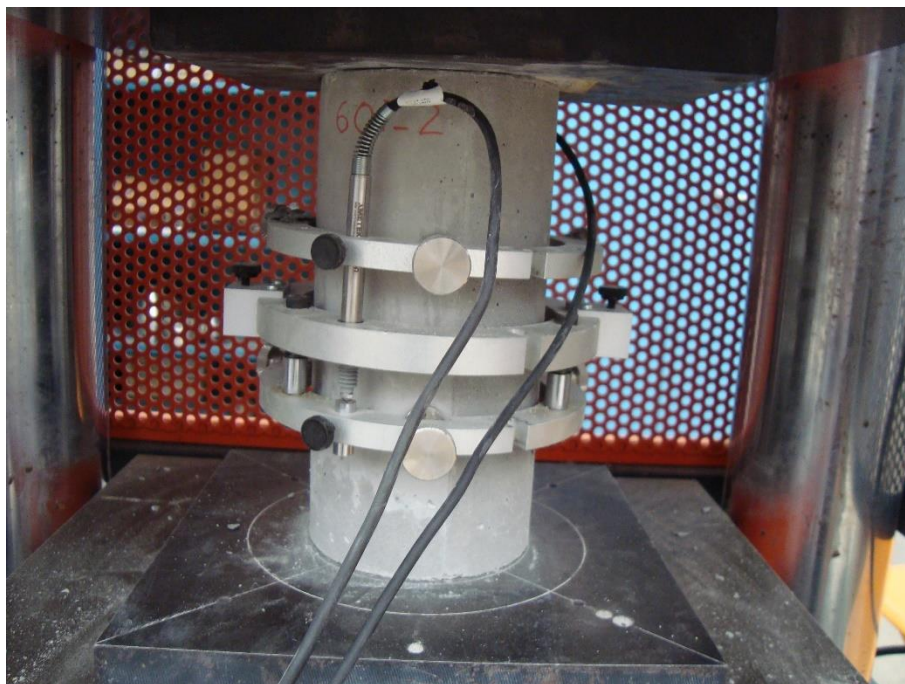


Ilustración 4-85. Fotografía del ensayo de la muestra AML_CIL_60F_2



AML CIL 60F 3

El módulo de elasticidad obtenido es de 35562 MPa según el promedio de los trazadores de desplazamiento.

Ilustración 4-86. Ciclos de carga de AML_CIL_60F_3

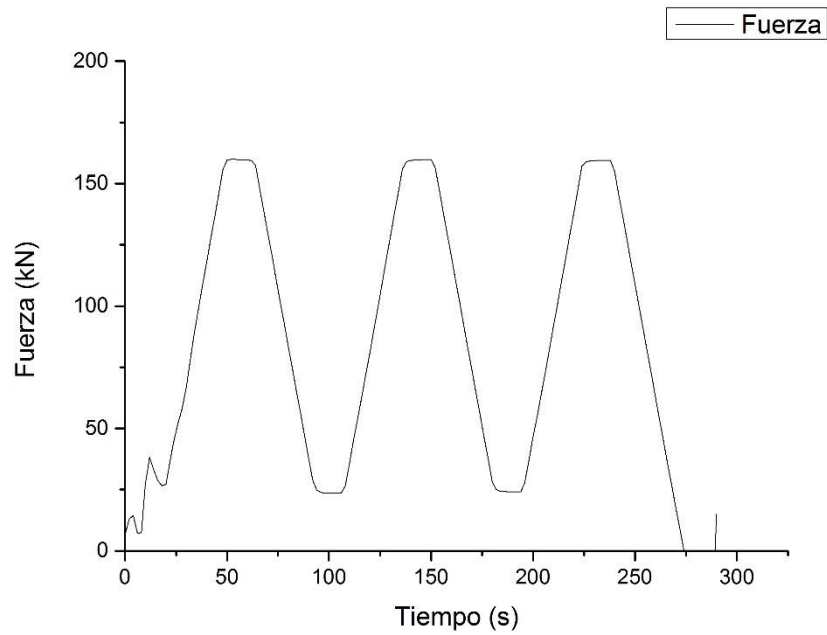


Ilustración 4-87. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_60F_3 según el promedio de los trazadores

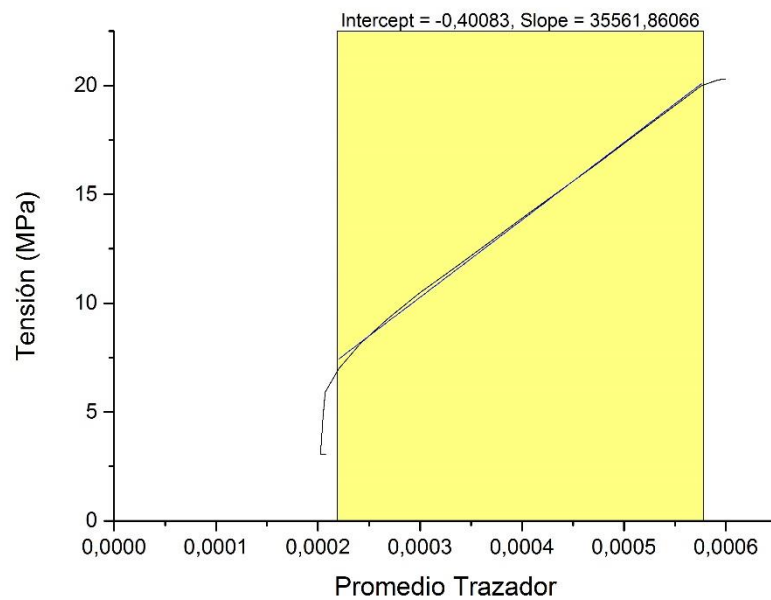


Ilustración 4-88. Fotografía del ensayo de la muestra AML_CIL_60F_3



AML CIL 60F 4

El módulo de elasticidad obtenido es de 27963 MPa según el promedio de los trazadores de desplazamiento.

Ilustración 4-89. Ciclos de carga de AML_CIL_60F_4

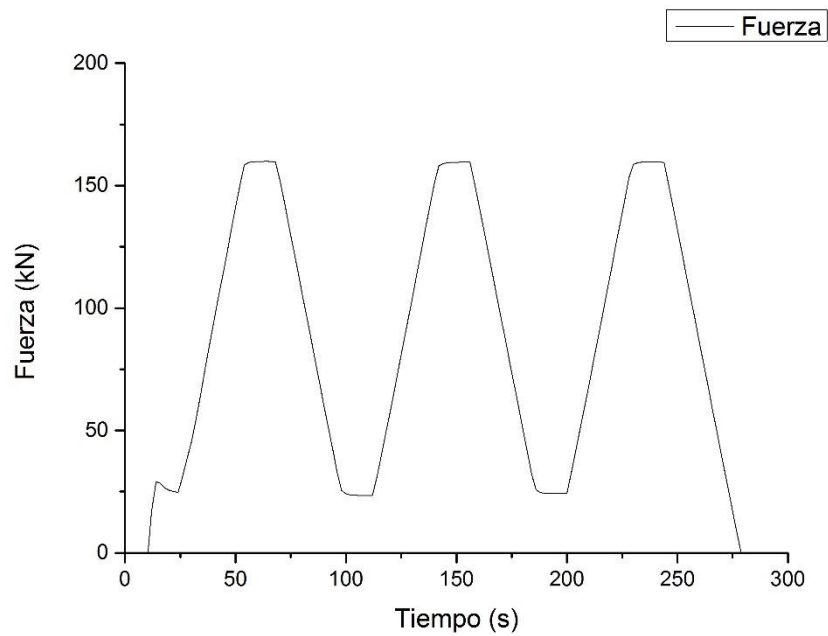


Ilustración 4-90. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_60F_4 según el promedio de los trazadores

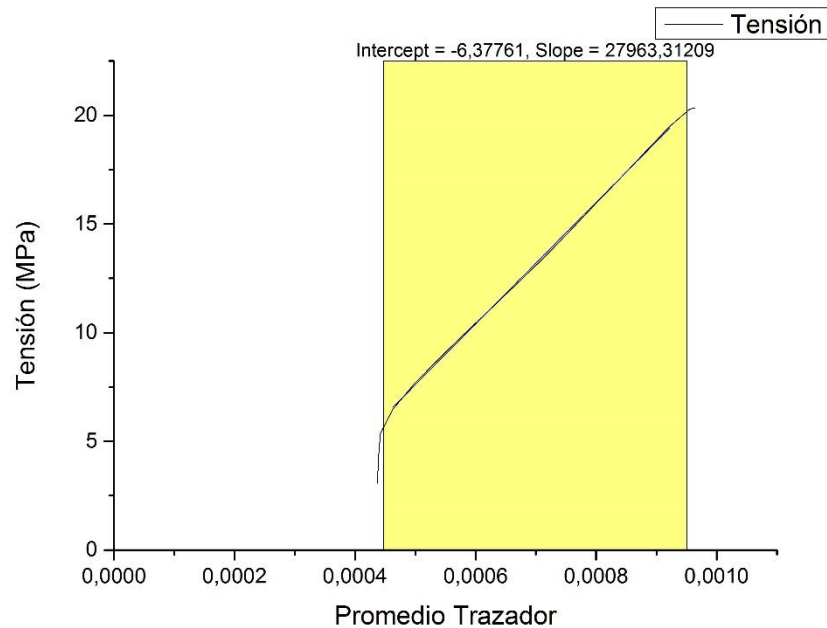
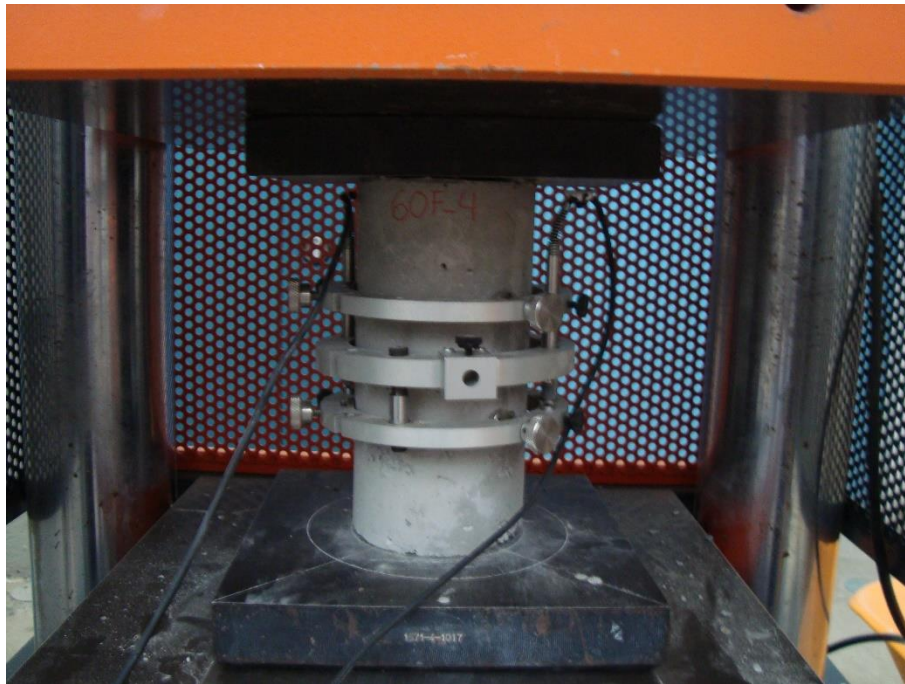


Ilustración 4-91. Fotografía del ensayo de la muestra AML_CIL_60F_4



El promedio de los módulos de elasticidad obtenido por los transductores es de 34138 MPa con una desviación típica relativa del 16,41%.

HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO 60 PA·S Y 80 MPa

Se han realizado 4 probetas cilíndricas y se han ensayado con los siguientes valores de tensiones en los ciclos:

- $f_c=56,88$ MPa
- $\sigma_a=18,77$ MPa
- $\sigma_p=2,83$ MPa

AML CIL 80F 1

El módulo de elasticidad obtenido es de 15775 MPa según el trazador 2 de desplazamiento, dado que el trazador 1 no aportó resultados. Como se puede observar, este valor está muy por debajo del resto de muestras por lo que será desechado en el análisis.

Ilustración 4-92. Ciclos de carga de AML_CIL_80F_1

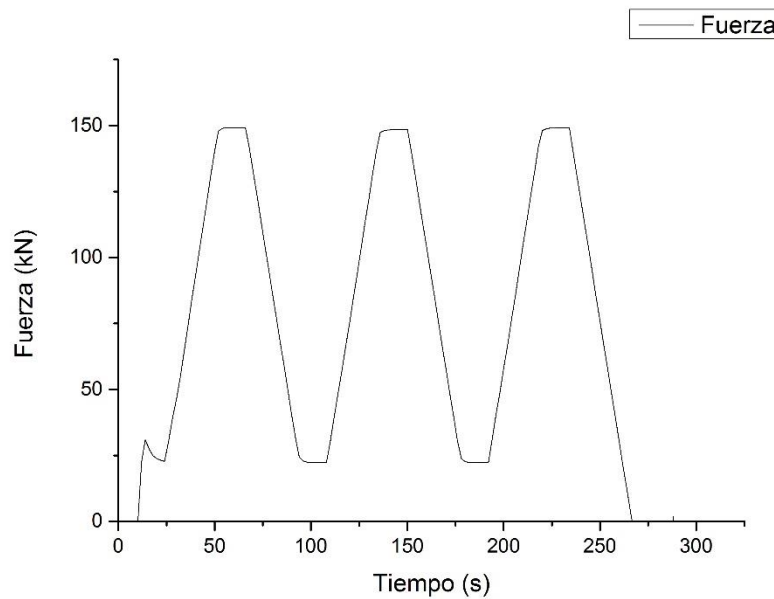


Ilustración 4-93. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_80F_1 según el promedio de los trazadores

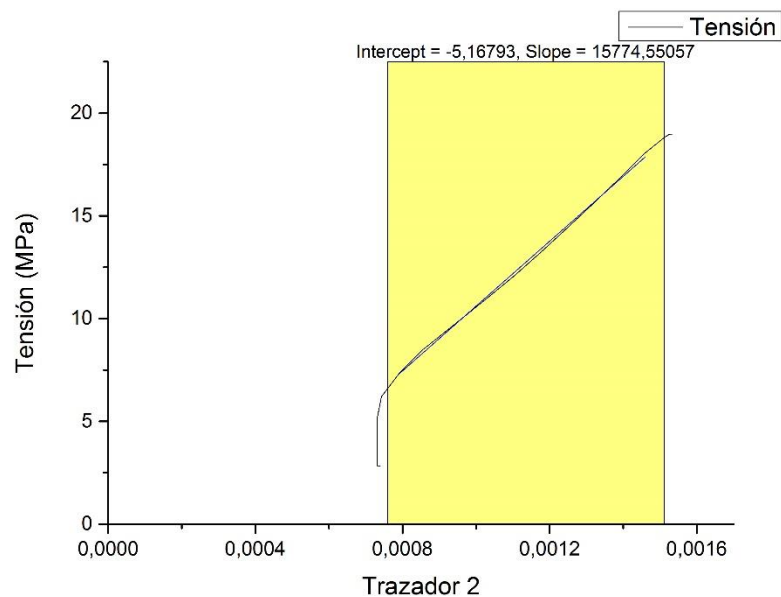


Ilustración 4-94. Fotografía del ensayo de la muestra AML_CIL_80F_1



AML CIL 80F 2

El módulo de elasticidad obtenido es de 36393 MPa según el promedio de los trazadores de desplazamiento.

Ilustración 4-95. Ciclos de carga de AML_CIL_80F_2

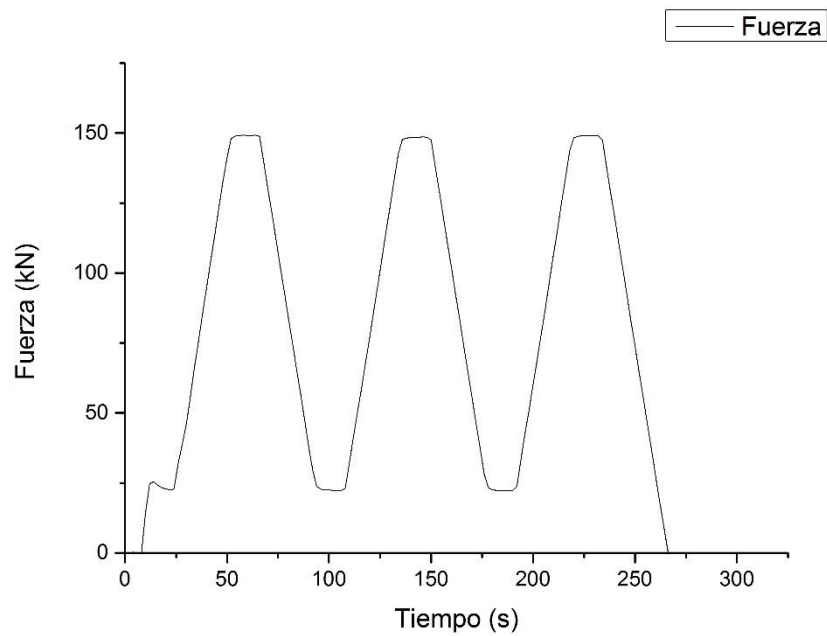


Ilustración 4-96. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_80F_2 según el promedio de los trazadores

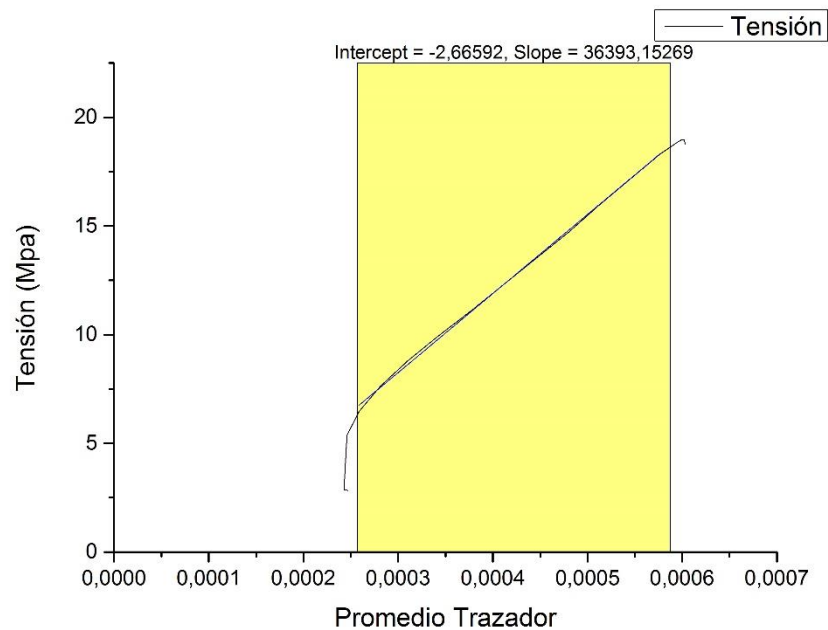


Ilustración 4-97. Fotografía del ensayo de la muestra AML_CIL_80F_2



AML CIL 80F 3

El módulo de elasticidad obtenido es de 37816 MPa según el promedio de los trazadores de desplazamiento.

Ilustración 4-98. Ciclos de carga de AML_CIL_80F_3

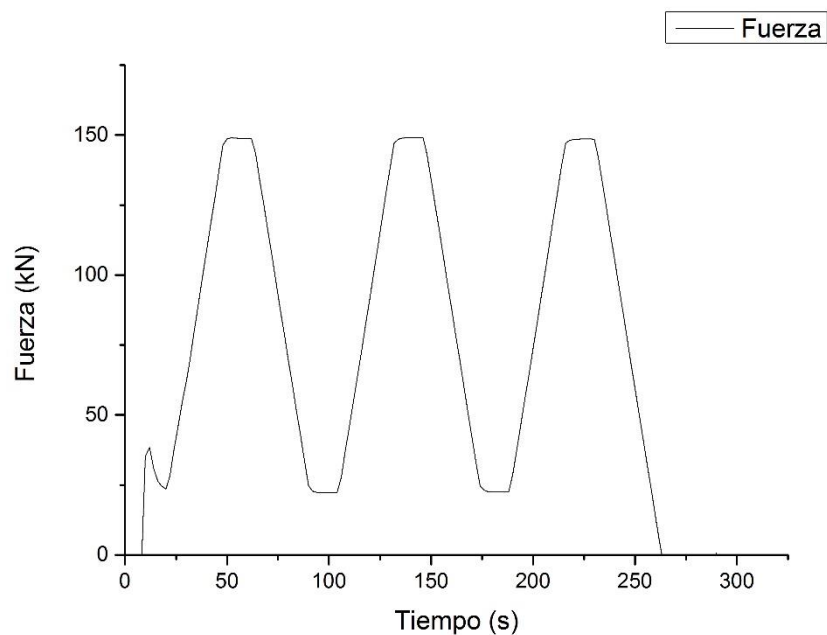


Ilustración 4-99. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_80F_3 según el promedio de los trazadores

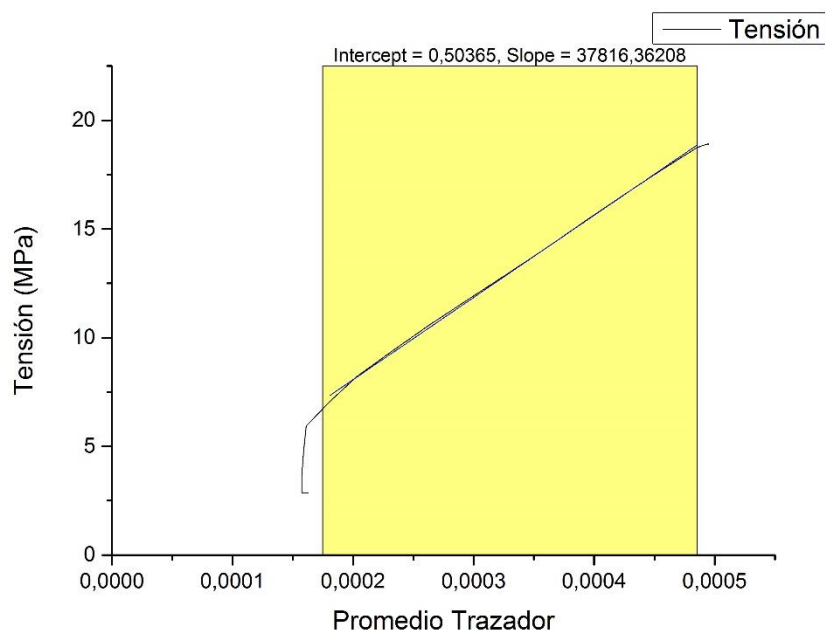


Ilustración 4-100. Fotografía del ensayo de la muestra AML_CIL_80F_3



AML CIL 80F 4

El módulo de elasticidad obtenido es de 37290 MPa según el promedio de los trazadores de desplazamiento.

Ilustración 4-101. Ciclos de carga de AML_CIL_80F_4

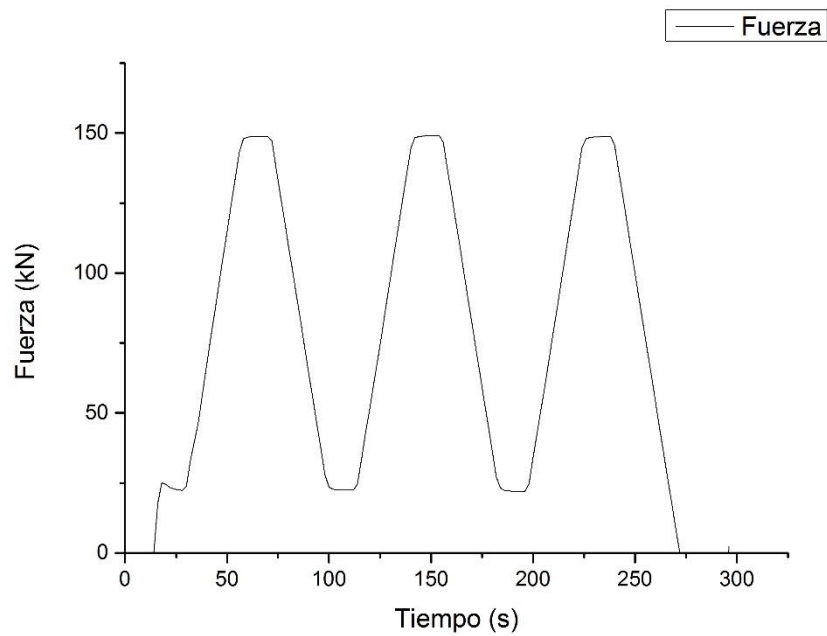


Ilustración 4-102. Pendiente del último ciclo de carga de la muestra AML_CIL_80F_4 según el promedio de los trazadores

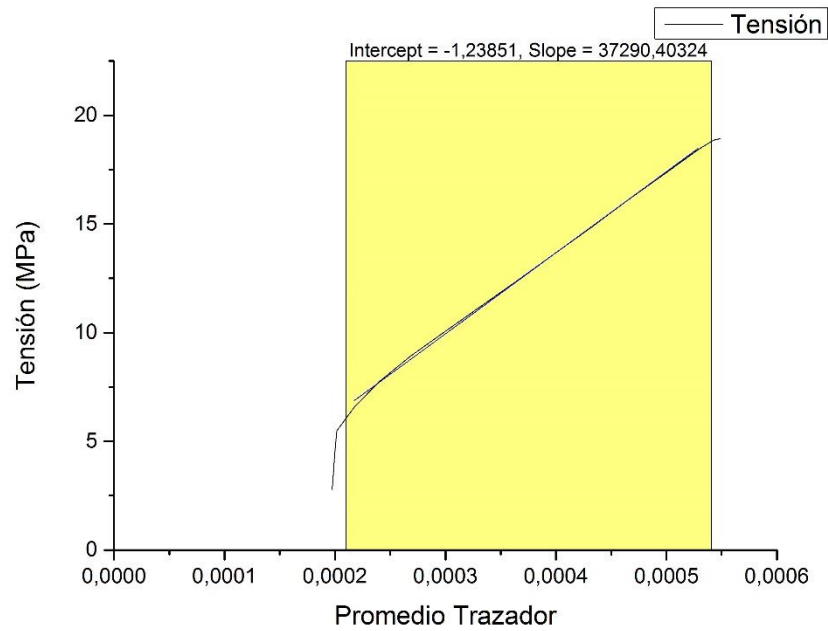


Ilustración 4-103. Fotografía del ensayo de la muestra AML_CIL_80F_4

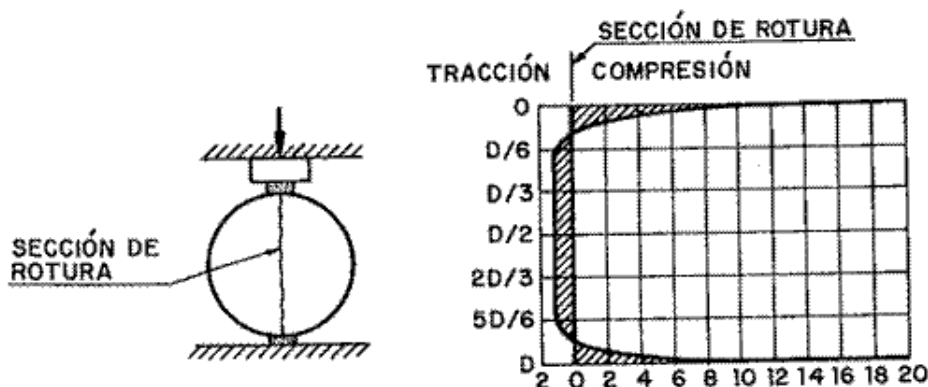


El promedio de los módulos de elasticidad obtenido por los transductores es de 37167 MPa con una desviación típica relativa del 1,94%.

4.4 Ensayo para obtener la resistencia a tracción indirecta

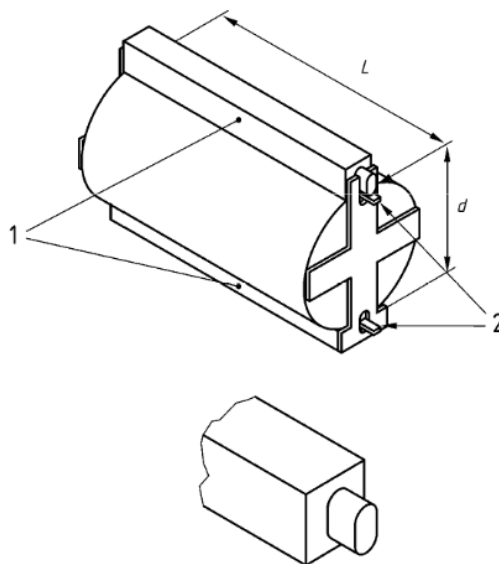
El ensayo para obtener la resistencia a tracción indirecta o ensayo brasileño [27] tiene como objetivo determinar la resistencia a tracción indirecta de probetas cilíndricas someténdolas a una fuerza de compresión aplicada en una banda estrecha en toda su longitud, en consecuencia, el resultado de la fuerza de tracción ortogonal resultante origina que la probeta se rompa a tracción. La norma de referencia es la UNE-EN 12390-6 [29].

Ilustración 4-104. Tensiones generadas por el ensayo brasileño [28].



El hormigón está endurecido, las probetas han sido rotas a los 45 días, y las probetas, según la norma, es opcional colocar un dispositivo para alinear las bandas de apoyo, sin embargo nosotros no lo usaremos en la mayoría de los ensayos dado que se deformó excesivamente quedando inservible para nuestro propósito, tampoco se usaron las bandas de apoyo pero se realizó igualmente en ensayo.

Ilustración 4-105. Dispositivo de ensayo para probetas cilíndricas [29]



Leyenda

- 1 Pieza de acero de carga
- 2 Bandas de apoyo de fibras prensadas
- L Longitud de la probeta
- d Diámetro de la probeta

Las probetas utilizadas son las mismas que las ensayadas con anterioridad para obtener el módulo de elasticidad, de 200 mm de longitud y 100 de diámetro aunque las de las amasadas sin fibras fueron serradas y pulidas hasta una longitud de 195 mm, tenida en cuenta en los cálculos.

El método de carga utilizado está determinado por un fichero de SERVOSIS, marca de la máquina que se utiliza en el ensayo, y reproducida por PCD2K que se ajusta a la normativa con la velocidad de carga en función de las dimensiones de la probeta.

HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE 9 PA·S Y 40 MPa

Se han ensayado 3 probetas cilíndricas de este hormigón.

AML CIL 40 1

El valor de la resistencia a tracción indirecta es de 2,37 MPa.

Ilustración 4-106. Fotografías del ensayo brasileño de la muestra AML CIL 40 1



AML CIL 40 2

El valor de la resistencia a tracción indirecta es de 3,25 MPa.

Ilustración 4-107. Fotografías del ensayo brasileño de la muestra AML CIL 40 2



AML CIL 40 3

El valor de la resistencia a tracción indirecta es de 3,18 MPa.

Ilustración 4-108. Fotografías del ensayo brasileño de la muestra AML CIL 40 3



La media de los resultados de las probetas ensayadas nos aporta una resistencia a tracción indirecta de 2,93 MPa y una desviación típica relativa del 16,67%.

HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE 9 PA·S Y 60 MPa

Se han ensayado 3 probetas cilíndricas de este hormigón, dado que una, la AML CIL 60 1 se fisuró durante el ensayo del módulo elástico.

AML CIL 60 2

El valor de la resistencia a tracción indirecta es de 4,46 MPa.

Ilustración 4-109. Fotografías del ensayo brasileño de la muestra AML CIL 60 2



AML CIL 60 3

El valor de la resistencia a tracción indirecta es de 5,37 MPa.

Ilustración 4-110. Fotografías del ensayo brasileño de la muestra AML CIL 60 3



AML CIL 60 4

El valor de la resistencia a tracción indirecta es de 5,00 MPa.

Ilustración 4-111. Fotografías del ensayo brasileño de la muestra AML CIL 60 4



La media de los resultados de las probetas ensayadas nos aporta una resistencia a tracción indirecta de 4,94 MPa y una desviación típica relativa del 9,26%.

HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE 9 PA·S Y 80 MPa

Se han ensayado 4 probetas cilíndricas de este hormigón.

AML CIL 80 1

El valor de la resistencia a tracción indirecta es de 4,41 MPa.

Ilustración 4-112. Fotografías del ensayo brasileño de la muestra AML CIL 80 1



AML CIL 80 2

El valor de la resistencia a tracción indirecta es de 6,24 MPa.

Ilustración 4-113. Fotografías del ensayo brasileño de la muestra AML CIL 80 2



AML CIL 80 3

El valor de la resistencia a tracción indirecta es de 3,84 MPa.

Ilustración 4-114. Fotografías del ensayo brasileño de la muestra AML CIL 80 3



AML CIL 80 4

El valor de la resistencia a tracción indirecta es de 4,80 MPa.

Ilustración 4-115. Fotografías del ensayo brasileño de la muestra AML CIL 80 4



La media de los resultados de las probetas ensayadas nos aporta una resistencia a tracción indirecta de 4,82 MPa y una desviación típica relativa del 21,23%.

HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO 60 PA·S Y 40 MPA

Se han ensayado 3 probetas cilíndricas de este hormigón.

AML CIL 40F 1

El valor de la resistencia a tracción indirecta es de 5,01 MPa.

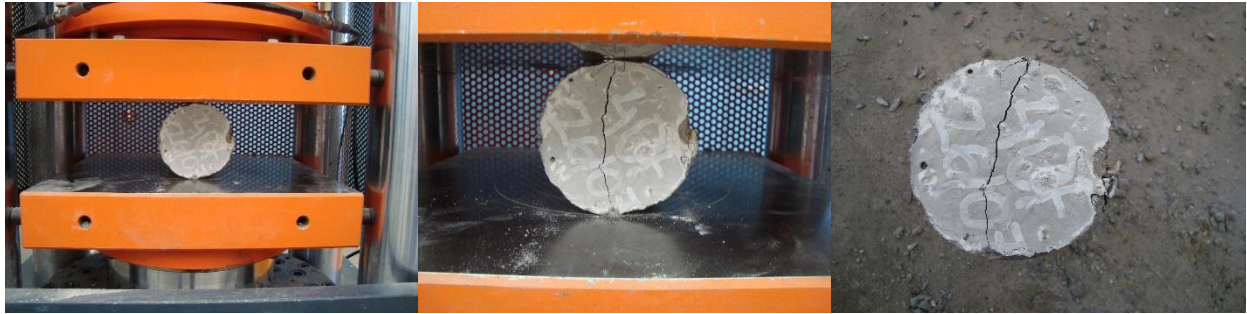
Ilustración 4-116. Fotografías del ensayo brasileño de la muestra AML CIL 40F 1



AML CIL 40F 2

El valor de la resistencia a tracción indirecta es de 4,41 MPa.

Ilustración 4-117. Fotografías del ensayo brasileño de la muestra AML CIL 40F 2



AML CIL 40F 3

El valor de la resistencia a tracción indirecta es de 5,5 MPa.

Ilustración 4-118. Fotografías del ensayo brasileño de la muestra AML CIL 40F 3



La media de los resultados de las probetas ensayadas nos aporta una resistencia a tracción indirecta de 4,97 MPa y una desviación típica relativa del 10,98%.

HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO 60 PA·S Y 60 MPa

Se han ensayado 4 probetas cilíndricas de este hormigón.

AML CIL 60F 1

El valor de la resistencia a tracción indirecta es de 5,15 MPa.

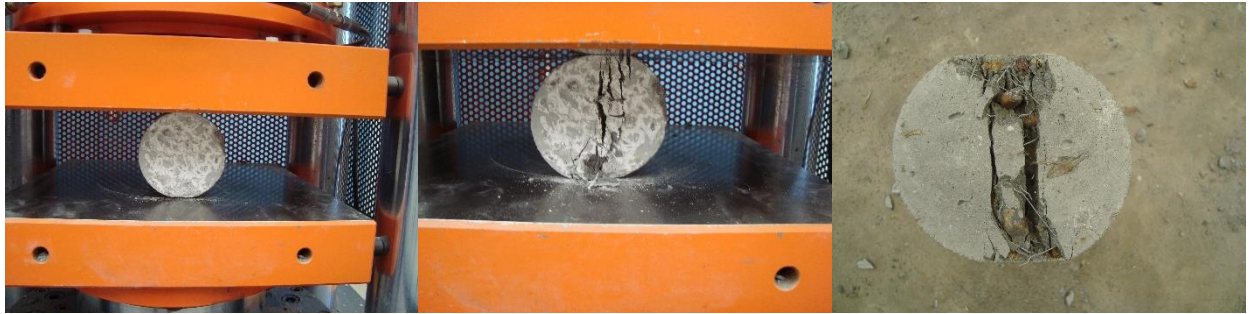
Ilustración 4-119. Fotografías del ensayo brasileño de la muestra AML CIL 60F 1



AML CIL 60F 2

El valor de la resistencia a tracción indirecta es de 5,59 MPa.

Ilustración 4-120. Fotografías del ensayo brasileño de la muestra AML CIL 60F 2



AML CIL 60F 3

El valor de la resistencia a tracción indirecta es de 6,12 MPa.

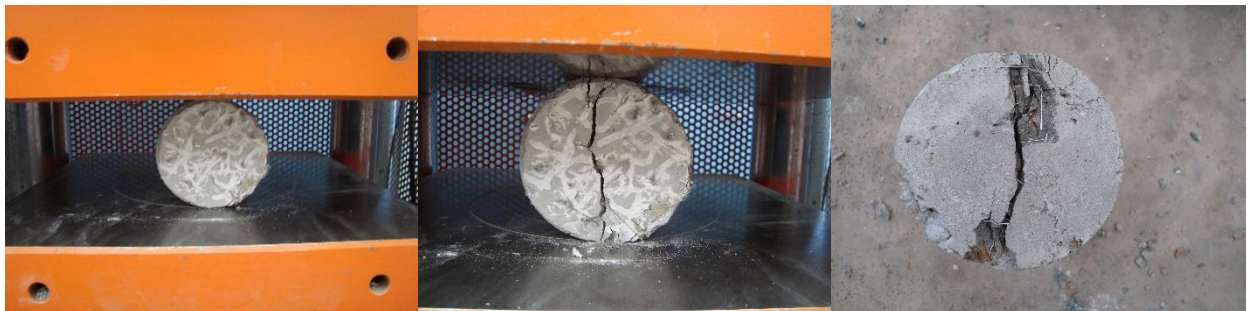
Ilustración 4-121. Fotografías del ensayo brasileño de la muestra AML CIL 60F 3



AML CIL 60F 4

El valor de la resistencia a tracción indirecta es de 5,33 MPa.

Ilustración 4-122. Fotografías del ensayo brasileño de la muestra AML CIL 60F 4



La media de los resultados de las probetas ensayadas nos aporta una resistencia a tracción indirecta de 5,68 MPa y una desviación típica relativa del 7,09%.

HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO 60 PA·S Y 80 MPa

Se han ensayado 4 probetas cilíndricas de este hormigón.

AML CIL 80F 1

El valor de la resistencia a tracción indirecta es de 5,92 MPa.

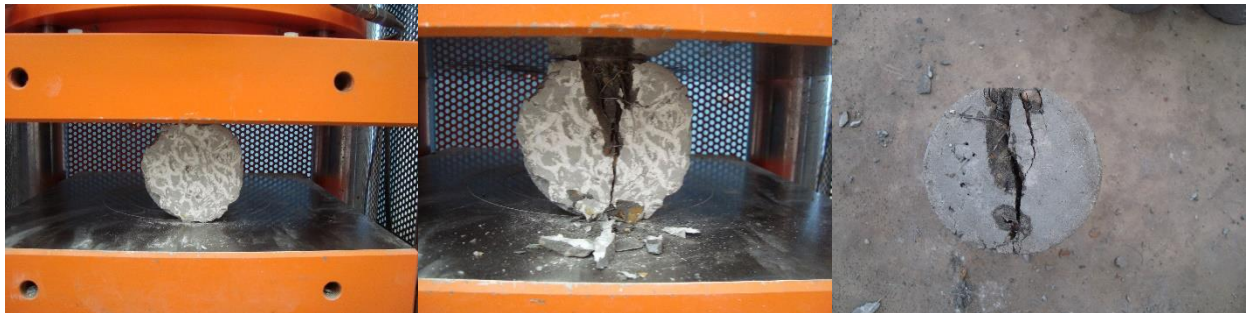
Ilustración 4-123. Fotografías del ensayo brasileño de la muestra AML CIL 80F 1



AML CIL 80F 2

El valor de la resistencia a tracción indirecta es de 4,53 MPa.

Ilustración 4-124. Fotografías del ensayo brasileño de la muestra AML CIL 80F 2



AML CIL 80F 3

El valor de la resistencia a tracción indirecta es de 6,25 MPa.

Ilustración 4-125. Fotografías del ensayo brasileño de la muestra AML CIL 80F 3



AML CIL 80F 4

El valor de la resistencia a tracción indirecta es de 4,44 MPa.

Ilustración 4-126. Fotografías del ensayo brasileño de la muestra AML CIL 80F 4



La media de los resultados de las probetas ensayadas nos aporta una resistencia a tracción indirecta de 5,29 MPa y una desviación típica relativa del 17,68%.

4.5 Ensayo para obtener la energía de fractura

El hormigón es un material con comportamiento cuasi-frágil que, debido a su baja resistencia a tracción (en torno al 10% de la resistencia a compresión), se encuentra normalmente fisurado. Esta fisuración está permitida en la mayoría de los códigos siempre que se encuentre en unos límites establecidos. Es por ello que se ha llevado a cabo el estudio de la mecánica de la fractura, de forma que se pudiera predecir la aparición y posterior aparición de grietas en el hormigón [30].

El comportamiento postpico del hormigón se debe a la aparición y crecimiento de grietas en el material, originándose previamente a la ruptura del elemento una zona denominada zona de proceso de fractura (ZPF) y que está íntimamente relacionada con diversos factores del material, como el tamaño máximo y tipo de áridos, cantidad y tipo de cemento empleado, etc.

En la zona de proceso de fractura suelen producirse unas microfisuras iniciales cuya longitud está relacionada con el tamaño máximo de árido. Estas microfisuras son capaces de transmitir tracciones entre ellas hasta un cierto límite, que suelen representar las fuerzas cohesivas del hormigón en la zona entre fisuras y son las responsables de que se produzca la curva de ablandamiento post-pico del hormigón. Cuando se llega a un determinado límite de carga estas microfisuras interconectan entre sí llegando a formar una macrogrieta, no siendo capaces de transmitir ninguna fuerza cohesiva a partir de ese instante.

Esta zona de proceso de fractura puede ser localizada en el frente de una macrogrieta preexistente o transcurriendo internamente entre los áridos y la pasta de cemento, sin que se aprecie ninguna grieta externa. La ZPF es una propiedad del material, de forma que un mismo hormigón presenta siempre el mismo valor de la ZPF, independientemente del tamaño del elemento.

Debido a la no linealidad en la curva de ablandamiento, no será adecuado el tratamiento de la teoría de la MFEL en el hormigón. Por ello, se ha desarrollado en los últimos años una teoría de mecánica de la fractura no lineal aplicable a materiales cuasifrágiles.

APLICACIÓN DE LA MECÁNICA DE FRACTURA ELÁSTICO LINEAL AL HORMIGÓN ESTRUCTURAL

Los intentos de aplicación de la teoría de la MFEL al hormigón han de estar en consonancia con la caracterización de la fractura a través de los parámetros K_{IC} , factor de intensidad de tensiones crítico, o G_F , energía de fractura del hormigón. Además, debe conocerse la ley de comportamiento del material una vez se haya alcanzado la tensión máxima admisible en las inmediaciones del vértice de una grieta. El comportamiento post-pico del material viene representado por la ley de ablandamiento y, como se ha dicho anteriormente, es originada por la aparición de microfisuras y el desarrollo de la ZPF. La energía consumida en la creación y desarrollo de la ZPF y por lo tanto, en la degeneración y fallo del material, es la energía de fractura del hormigón. Esta energía de fractura del hormigón, G_F , se define como la cantidad de energía necesaria para la creación de una grieta de superficie unidad en el hormigón.

En los primeros intentos de aplicación de la MFEL al hormigón se observó tanto K_{IC} como G_F no son constantes para un mismo hormigón, sino que varían con respecto a factores tales como la profundidad relativa de entalla, las dimensiones del espécimen ensayado y el tamaño del árido entre otros.

La energía de fractura, G_F , permite la determinación de la curva de ablandamiento del material y es un dato de partida fundamental para los distintos modelos de comportamiento del hormigón.

La energía de fractura según la MFEL, G_C , está relacionada con el factor de intensidad de tensiones crítico, K_{IC} , a través de la fórmula:

$$G_C = \frac{K_{IC}^2}{E'}$$

Las expresiones para obtener el factor de intensidad de tensiones se pueden obtener de diversos manuales. Para el caso de un espécimen sometido a un ensayo a flexión en tres puntos se tiene:

$$K_{IC} = 6 \cdot Y \cdot M_{MAX} \cdot \frac{\sqrt{a}}{B \cdot W^2}$$

Donde el parámetro Y es un parámetro de ajuste función de la profundidad relativa de la fisura previa y de la geometría.

El valor de G_C obtenido de la manera expuesta anteriormente es una energía desde el punto de vista teórico, no coincidiendo con los valores experimentales obtenidos de forma directa de la energía de fractura del hormigón G_F .

La forma más directa de obtener el valor de la energía de fractura en hormigón es a través del trabajo de fractura de ensayos basados en la carga de rotura de la probeta. Para ello, se obtiene el trabajo de fractura, W_F , registrando la evolución de la carga y el desplazamiento para un caso de flexión en tres puntos y así se obtiene la energía de fractura como:

$$G_F = \frac{W_F}{A_{lig}}$$

Siendo:

$A_{lig} = B(W - a)$: el área que ha de fracturarse.

W_F : el área encerrada por la curva P- δ obtenida.

Esta variación entre G_C y G_F se debe a varios factores:

- Disipación de energía por las deformaciones de la propia máquina empleada en el ensayo.
- Consumo de energía por la fisuración de la muestra en el punto de aplicación de la carga y en los apoyos.
- El frente de fractura no es totalmente uniforme.
- La trayectoria de la grieta es aleatoria y discurre entre las interfases del árido grueso.
- Se produce disipación de energía en otras partes del espécimen alejadas del frente de fractura.

Por tanto, es necesaria la determinación experimental de las propiedades de fractura del hormigón, no siendo posible su obtención a través de las relaciones establecidas por la MFEL.

ENERGÍA DE FRACTURA

La manera más directa de obtener el valor de G_F es mediante el ensayo a flexión en tres puntos de una probeta entallada de hormigón y es la que se ha llevado a cabo en el análisis experimental. La energía de fractura se calcula en función del trabajo de fractura W_F generado en la propagación de la grieta en la zona de ligamento del material y que está representado por el área encerrada por la curva P- δ medida durante el ensayo.

Normalmente en este tipo de ensayos se suele medir adicionalmente la apertura de la boca de la grieta, CMOD, que presenta un crecimiento más estable y facilita el control del ensayo.

El método de la asociación internacional RILEM propuesto detalla el procedimiento de obtención de la energía de fractura sobre probetas entalladas de hormigón, con sección rectangular, y sometidas a ensayos de flexión en tres puntos. La energía de fractura obtenida, o más correctamente la densidad de energía de fractura o energía de fractura específica, se define como la cantidad de energía necesaria para crear una unidad de área de grieta. El área de la grieta se define como el área proyectada en un plano paralelo a la entalla inicial, lo que facilita su determinación especialmente en el caso de crecimientos de grieta tortuosos.

La entalla inicial se ha realizado mediante el corte por sierra de disco una vez endurecido y curado el hormigón.

Los apoyos y utillaje de aplicación de la carga deben ser antitorsión, de manera que se eviten disipaciones parásitas por torsiones secundarias. El ensayo debe realizarse en una máquina dinámica servo-hidráulica con control en desplazamiento o apertura de la boca de la grieta (CMOD). La instrumentación que debe realizarse, además de la medida vertical (δ) del punto de aplicación de la carga. Este transductor se debe colocar de manera que solo se recoja la deformación debida a la deformación por flexión de la probeta. Es aconsejable la colocación de un transductor de pinza adicional para el control y medida del CMOD.

MODELO DE ENERGÍA DE FRACTURA LOCAL

El modelo de energía de fractura local (MEFL) que ha sido desarrollado por Hu et al. considera el efecto del borde libre superior del espécimen de la ZPF. Cada vez que la grieta se propaga, la ZPF avanza hacia el borde superior de la probeta, estando influenciado su avance por la presencia de un límite material como es el borde libre superior de la probeta. Este ha sido el modelo seguido en el análisis experimental que se presenta.

Concepto de energía de fractura local

A medida que la grieta avanza la zona de ligamento hacia el borde libre superior, la superficie de material sin fisurar disminuye y por lo tanto se alcanza una zona en la cual no puede ser generada toda la ZPF. Por tanto, la energía de fractura debe disminuir en los puntos del material de la zona de ligamento más próximos al borde superior libre de la probeta, llegando a tener un valor nulo justo en los puntos del material situados en dicho borde superior. En los puntos de la zona de ligamento donde sí se puede desarrollar por completo la ZPF se considera que se está produciendo la energía de fractura real del hormigón (G_{FT}), empezando a disminuir en aquella zona del área de ligamento donde no se puede generar la ZPF completa. La longitud de la zona de ligamento donde la energía de fractura consumida por el material disminuye, por su proximidad al borde superior, se denomina zona de transición.

Por este motivo, en el MEFL se considera una distribución de energía de fractura local variable (g_f) en la zona de ligamento, disminuyendo desde el valor de energía de fractura independiente del tamaño, G_{FT} , hasta anularse en el borde libre superior de la probeta durante la zona de transición.

Mediante este MEFL, sus autores explican el efecto tamaño obtenido en los valores de la energía de fractura RILEM. Así, en aquellos elementos con una gran zona de ligamento (probetas de gran tamaño y/o pequeña profundidad inicial de entalla) la zona de transición tiene una menor influencia. Para tamaños muy grandes la zona de transición es prácticamente despreciable frente a la totalidad de la zona de ligamento, por lo que el valor de la energía de fractura RILEM se aproximará más al valor de la energía de fractura independiente del tamaño (G_{FT}) que en el caso de elementos pequeños. Un elemento de tamaño infinito debería presentar un valor de la energía de fractura RILEM coincidente con el valor de la energía de fractura real.

Formulación del modelo de energía de fractura local

La función $g_f(x)$ considera un valor de la energía de fractura local constante e igual al valor de la energía de fractura independiente al tamaño (G_{FT}), hasta un determinado punto a partir del cual disminuye linealmente hasta anularse en el límite del borde superior. Esta zona de disminución viene determinada por el valor a_l , considerada como la longitud de la zona de transición.

Considerando esta aproximación bilineal de la distribución de energía de fractura local, la formulación del MEFL se simplifica enormemente, necesitándose únicamente los resultados experimentales de la energía de fractura RILEM (G_F) de especímenes con distinta área de ligamento.

Para un espécimen con una longitud de la zona de ligamento ($D-a$) mayor que la zona de transición a_l , la energía de fractura local viene determinada por la siguiente expresión:

$$g_f(x) = \begin{cases} G_{FT}; & \text{si } x < D - a - a_l \\ G_{FT} \left[1 - \frac{x - (D - a - a_l)}{a_l} \right]; & \text{si } x \geq D - a - a_l \end{cases}$$

El valor de la energía de fractura obtenido mediante el procedimiento RILEM, G_F , está relacionado con la energía de fractura local a través de la siguiente expresión:

$$G_F = \frac{\int_0^{D-a} g_f(x) dx}{D - a}$$

En función de los datos experimentales obtenidos de G_F para distintos tamaños y profundidades relativas de entalla (α), se pueden obtener los valores de G_{FT} y a_l .

Procedimiento experimental. Método simplificado

El procedimiento de determinación experimental planteado por Hu et al. precisa de la determinación de la energía de fractura RILEM para probetas de un mismo tamaño con diferentes profundidades relativas de entalla. El número de probetas con distinta profundidad relativa de entalla a ensayar deberá ser el mayor posible. De esta forma, se pueden obtener los valores de la energía de fractura real G_{FT} y de la longitud de la zona de transición a_l mediante la ecuación anterior aplicada a los resultados experimentales disponibles. Así, Abdalla y Karihaloo comprobaron que mediante la aplicación del MEFL a los resultados de sus ensayos, se obtienen unos valores de la energía de fractura real que son prácticamente constantes e independientes del tamaño de la probeta, pudiendo considerarse un valor único de la energía de fractura independiente del tamaño G_{FT} .

La ecuación considera dos variables desconocidas (G_{FT} y a_l), de forma que matemáticamente sería necesario disponer únicamente de los resultados experimentales de dos probetas de idéntico tamaño y distinta profundidad relativa de entalla para la determinación de estas variables, en las pruebas realizadas se han hecho entallas de 10 y de 60 mm.

Con este procedimiento simplificado la determinación experimental de la energía de fractura G_{FT} del hormigón es bastante sencilla, considerando un único tamaño de probeta. Así, se reducen los tiempos de fabricación y de ejecución en laboratorio.

De las 3 amasadas de hormigón autocompactante se han realizada 8 probetas rectangulares de 440x100x100 mm de las cuales, como ya se ha indicado, 4 han sido entalladas con una profundidad de 10 mm y las otras 4 presentan una entalla de 60 mm de longitud. Aunque este ha sido el conjunto de muestras no todas han servido para realizar el análisis experimental como se verá a continuación.

En primer lugar, se obtiene experimentalmente el trabajo de fractura W_f , para después hallar la energía de fractura G_f , de cada probeta para hallar finalmente, a partir del resultado promedio de los dos grupos de probetas la energía de fractura independiente al tamaño (G_{FT}) y la longitud de la zona de transición a_l de cada hormigón.

HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE 9 PA·S Y 40 MPA

De estas probetas se han podido utilizar las 8 teniendo un amplio espacio muestral para el análisis experimental.

AML ST 40 1 1

- $W_{f0.1}=0,57125 \text{ Nm}$
- $A_{lig}=0,009 \text{ m}^2$
- $G_{f0.1}=63,47 \text{ N/m}$

Ilustración 4-127. Gráfica P- δ y valor de $W_{f0.1}$ de la muestra AML_ST_40_1_1

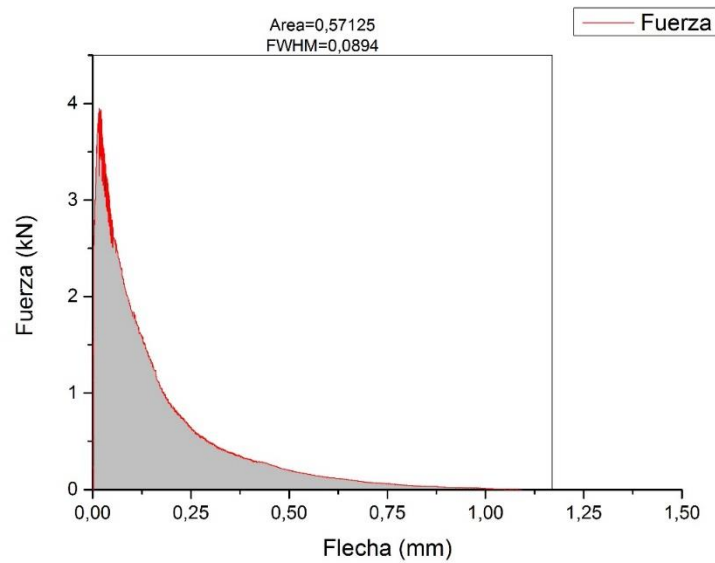


Ilustración 4-128. Fotografías del ensayo de energía de fractura de AML_ST_40_1_1



AML ST 40 1 2

- $W_{f0.1}=0,58745 \text{ Nm}$
- $A_{lig}=0,009 \text{ m}^2$
- $G_{f0.1}=65,27 \text{ N/m}$

Ilustración 4-129. Gráfica P- δ y valor de $W_{f0.1}$ de la muestra AML_ST_40_1_2

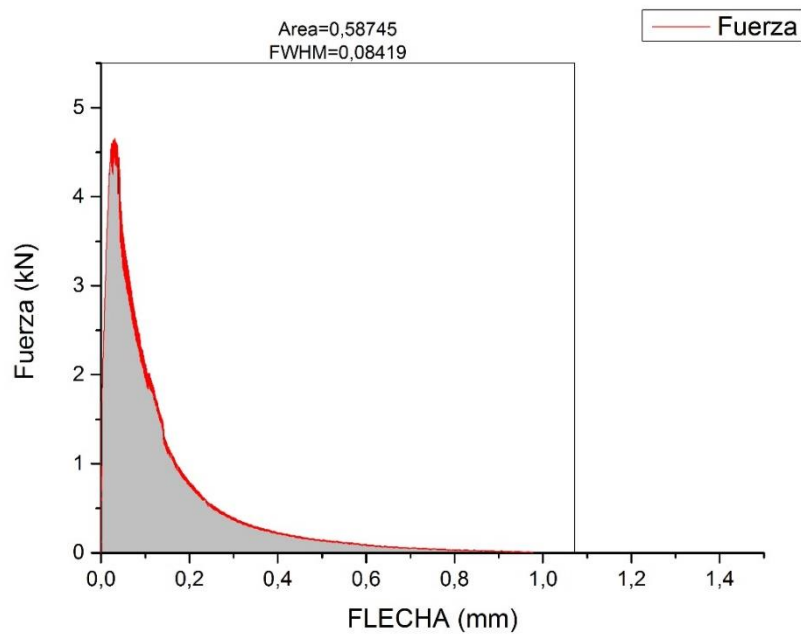
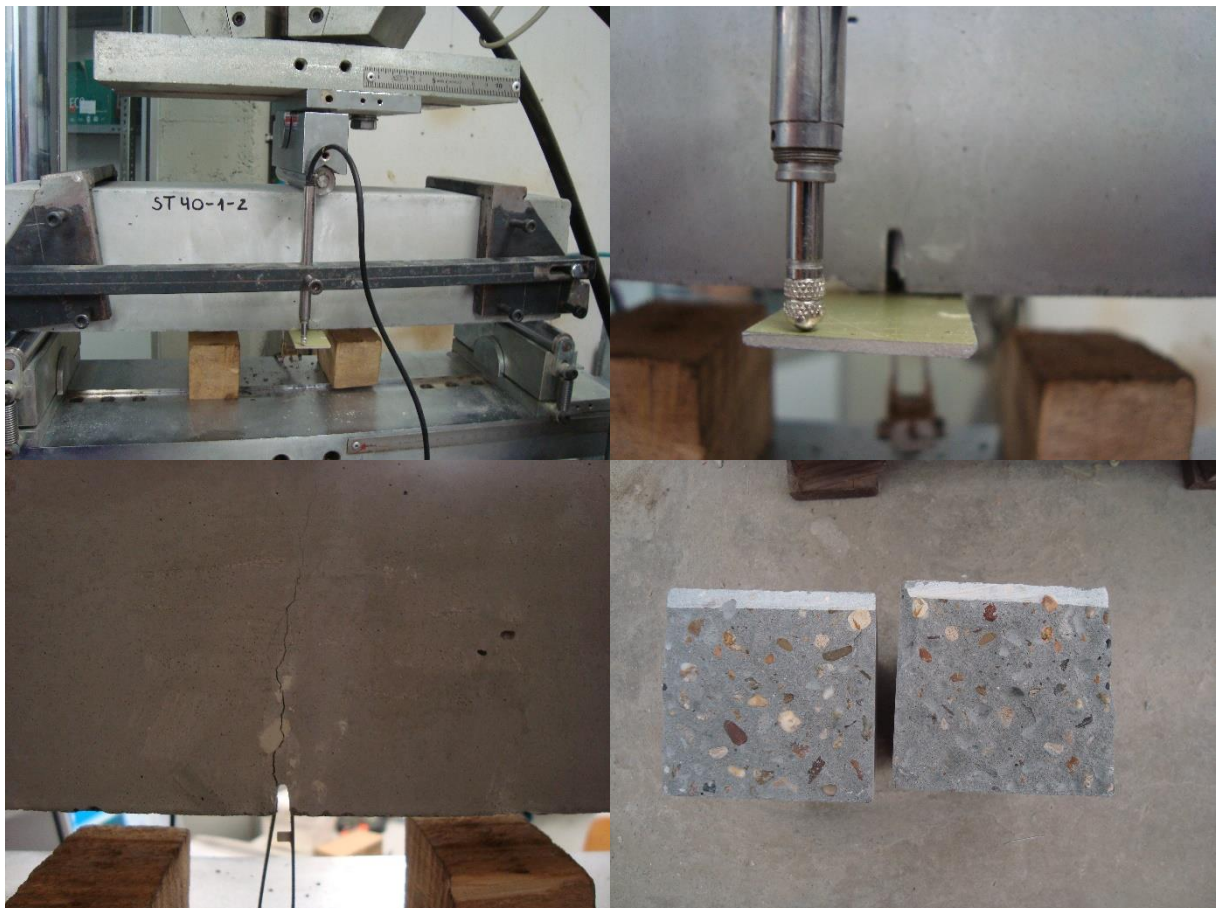


Ilustración 4-130. Fotografías del ensayo de energía de fractura de AML_ST_40_1_2



AML ST 40 1 3

- $W_{f0.1}=0,65567 \text{ Nm}$
- $A_{lig}=0,009 \text{ m}^2$
- $G_{f0.1}=72.85 \text{ N/m}$

Ilustración 4-131. Gráfica P- δ y valor de $W_{f0.1}$ de la muestra AML_ST_40_1_3

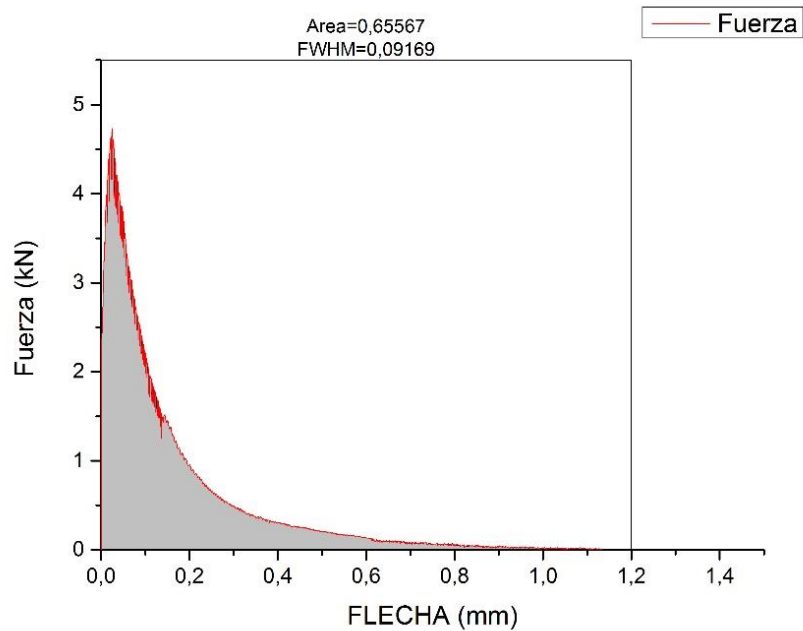


Ilustración 4-132. Fotografías del ensayo de energía de fractura de AML_ST_40_1_3



AML ST 40 1 4

- $W_{f0.1}=1,07085 \text{ Nm}$
- $A_{lig}=0,009 \text{ m}^2$
- $G_{f0.1}=118,98 \text{ N/m}$

Ilustración 4-133. Gráfica P- δ y valor de $W_{f0.1}$ de la muestra AML_ST_40_1_4

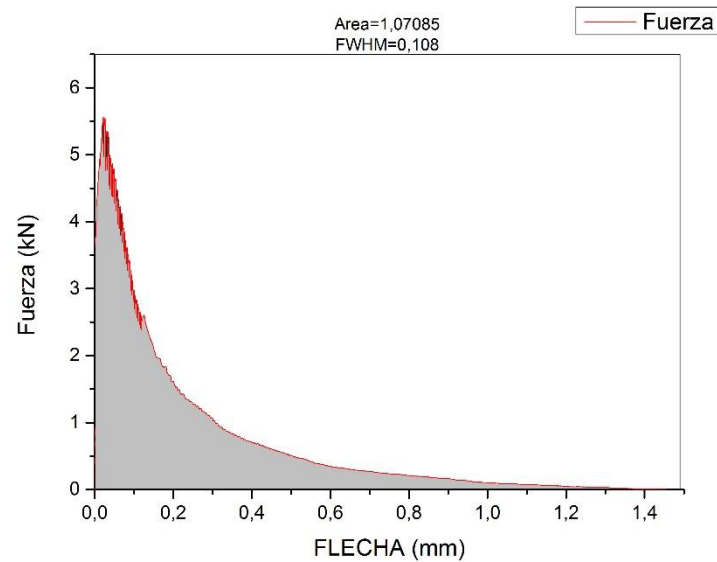


Ilustración 4-134. Fotografías del ensayo de energía de fractura de AML_ST_40_1_4



Realizando el promedio de las energías de fractura locales de cada probeta obtenemos el dato que utilizaremos para hallar la independiente al tamaño. La media de los resultados nos aporta un valor de $G_{f0.1}$ de 80,15 N/m con una desviación típica relativa algo elevada de 32,70%.

AML ST 40 6 1

- $W_{f0.6}=0,25674 \text{ Nm}$
- $A_{lig}=0,004 \text{ m}^2$
- $G_{f0.6}=64,185 \text{ N/m}$

Ilustración 4-135. Gráfica P- δ y valor de $W_{f0.6}$ de la muestra AML_ST_40_6_1

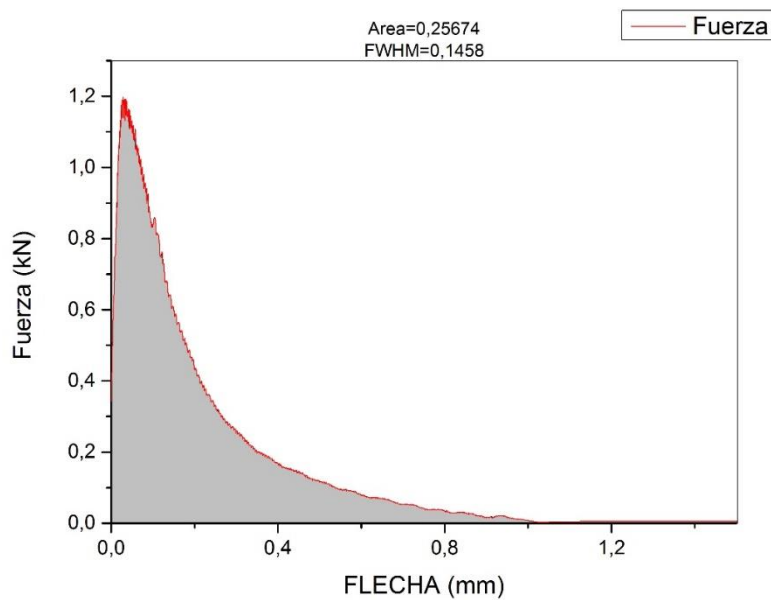


Ilustración 4-136. Fotografías del ensayo de energía de fractura de AML_ST_40_6_1



AML ST 40 6 2

- $W_{f0.6}=0,32568 \text{ Nm}$
- $A_{lig}=0,004 \text{ m}^2$
- $G_{f0.6}=81,42 \text{ N/m}$

Ilustración 4-137. Gráfica P- δ y valor de $W_{f0.6}$ de la muestra AML_ST_40_6_2

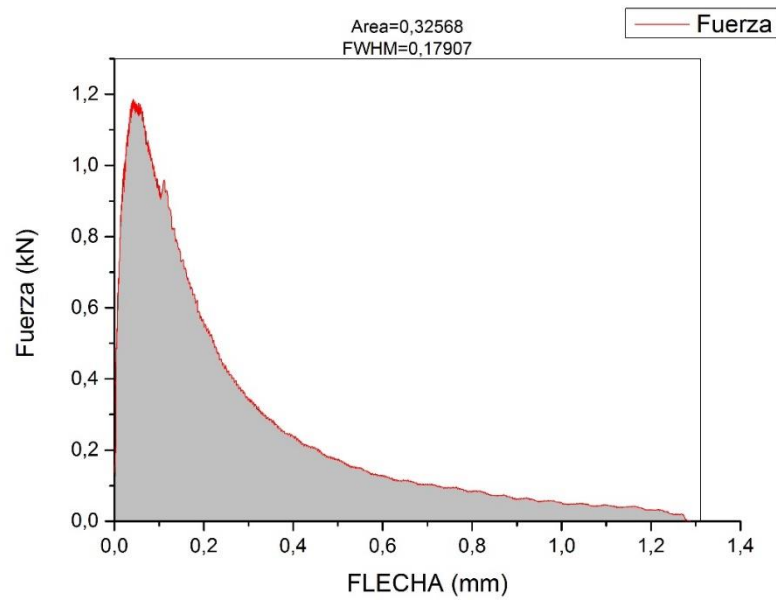
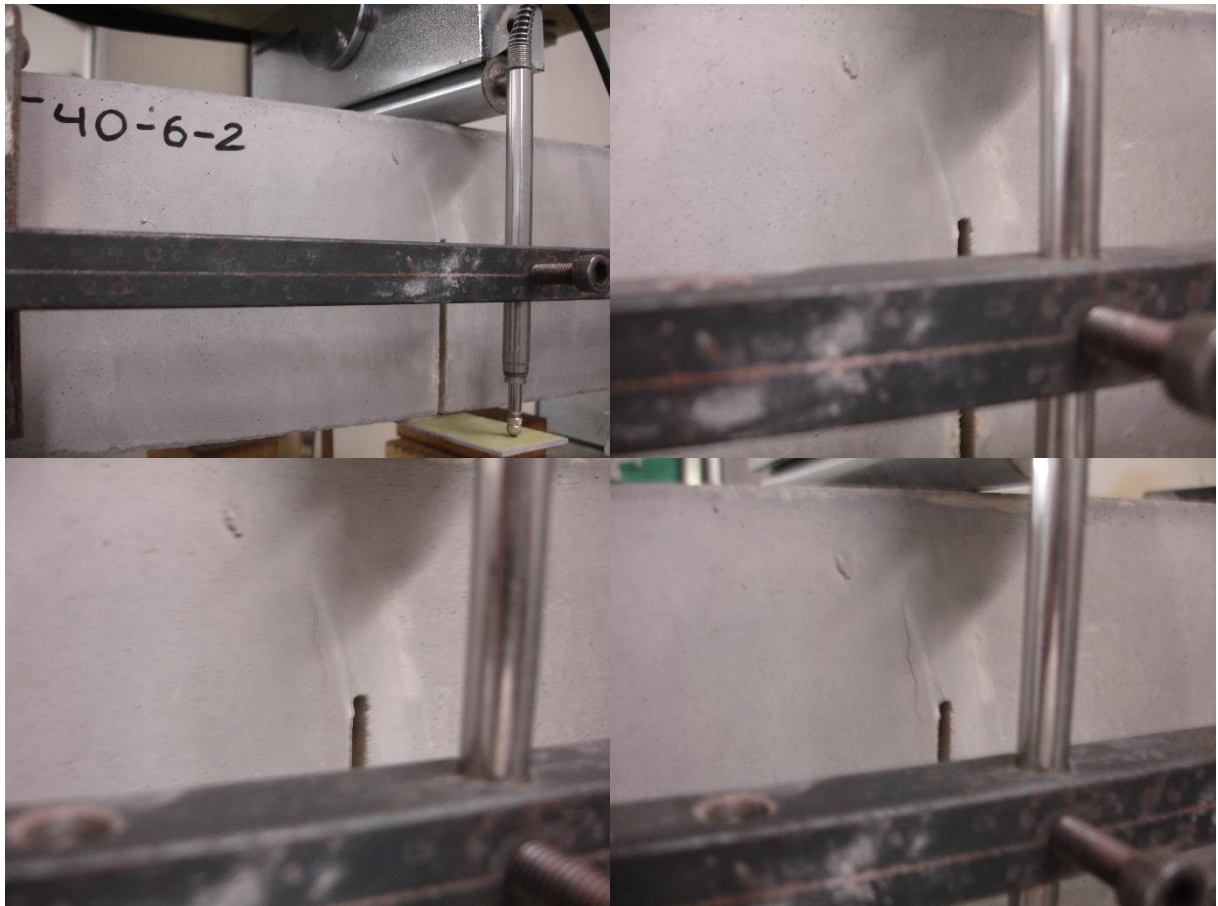


Ilustración 4-138. Fotografías del ensayo de energía de fractura de AML_ST_40_6_2



AML ST 40 6 3

- $W_{f0.6}=0,28995 \text{ Nm}$
- $A_{lig}=0,004 \text{ m}^2$
- $G_{f0.6}=72,49 \text{ N/m}$

Ilustración 4-139. Gráfica P- δ y valor de $W_{f0.6}$ de la muestra AML_ST_40_6_3

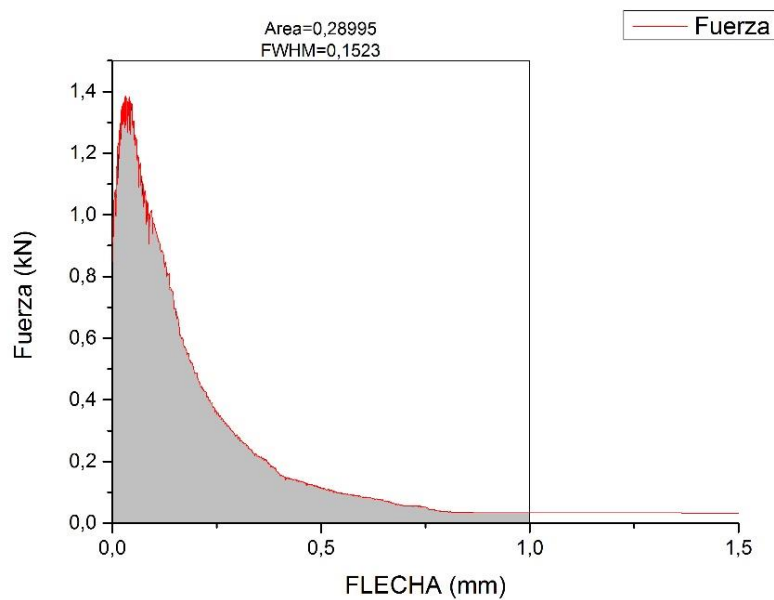
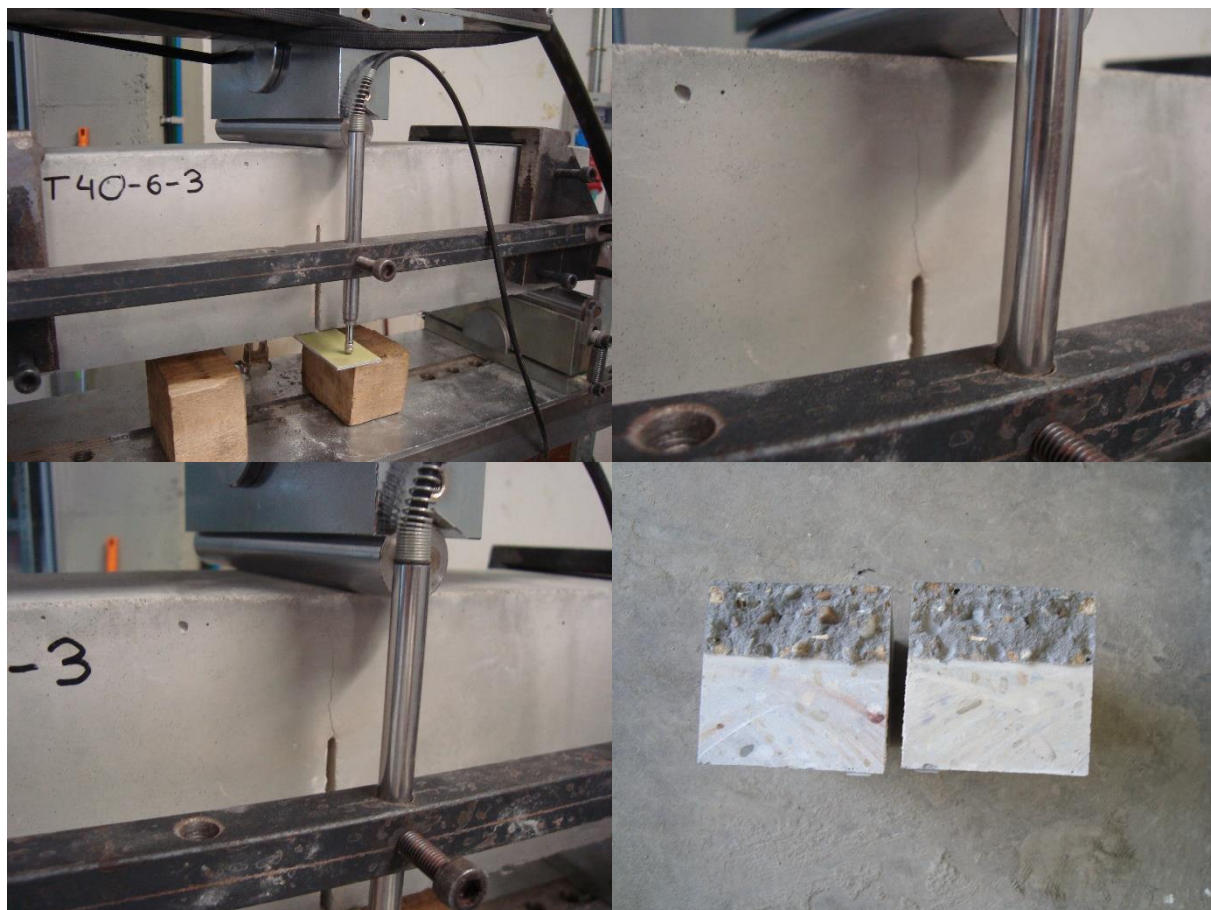


Ilustración 4-140. Fotografías del ensayo de energía de fractura de AML_ST_40_6_3



AML ST 40 6 4

- $W_{f0.6}=0,34725 \text{ Nm}$
- $A_{lig}=0,004 \text{ m}^2$
- $G_{f0.6}=86,81 \text{ N/m}$

Ilustración 4-141. Gráfica P- δ y valor de $W_{f0.6}$ de la muestra AML_ST_40_6_4

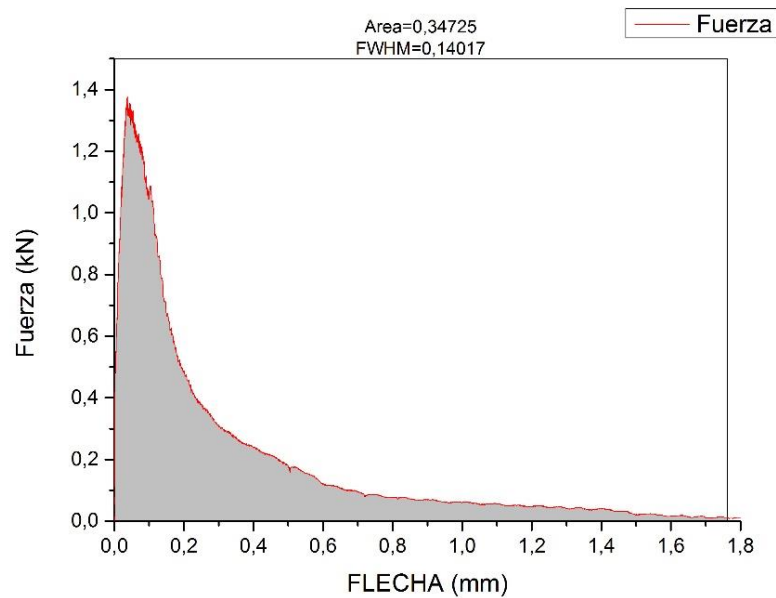
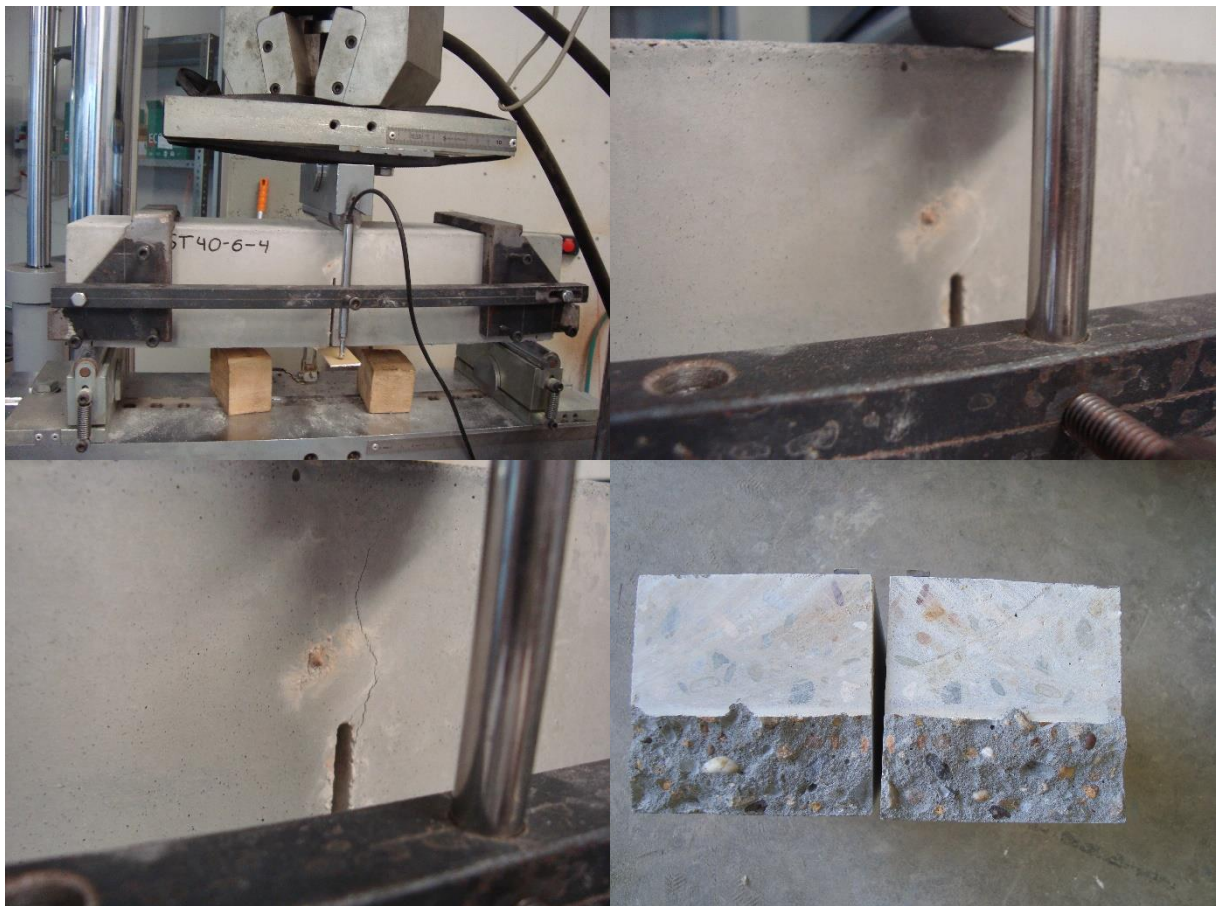


Ilustración 4-142. Fotografías del ensayo de energía de fractura de AML_ST_40_6_4



Realizando el promedio de las energías de fractura locales de cada probeta obtenemos el dato que utilizaremos para hallar la independiente al tamaño. La media de los resultados nos aporta un valor de $G_{f0,6}$ de 76,23 N/m con una desviación típica relativa de 15,99%.

Con los datos de $G_{f0,1}$ y $G_{f0,6}$ ya se está en disposición de hallar G_F y a_f :

- $G_F=83,28$
- $a_f=6,78$ mm

HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE 9 PA·S Y 60 MPA

De estas probetas se han podido utilizar las 7 de las 8 fabricadas ya que la muestra AML_ST_60_6_2 se rompió durante su manipulación.

AML ST 60 1 1

- $W_{f0.1}=0,98464 \text{ Nm}$
- $A_{lig}=0,009 \text{ m}^2$
- $G_{f0.1}=109,40 \text{ N/m}$

Ilustración 4-143. Gráfica P- δ y valor de $W_{f0.1}$ de la muestra AML_ST_60_1_1

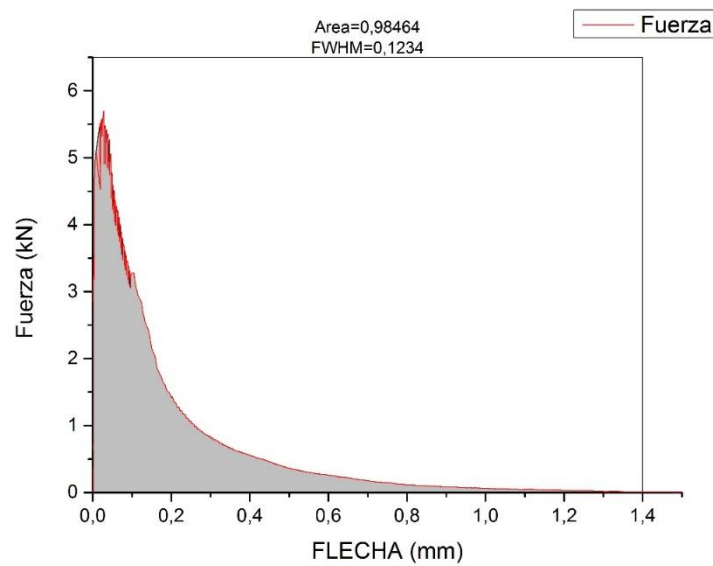


Ilustración 4-144. Fotografías del ensayo de energía de fractura de AML_ST_60_1_1



AML ST 60 1 2

- $W_{f0.1}=1,04374 \text{ Nm}$
- $A_{lig}=0,009 \text{ m}^2$
- $G_{f0.1}=115,97 \text{ N/m}$

Ilustración 4-145. Gráfica P- δ y valor de $W_{f0.1}$ de la muestra AML_ST_60_1_2

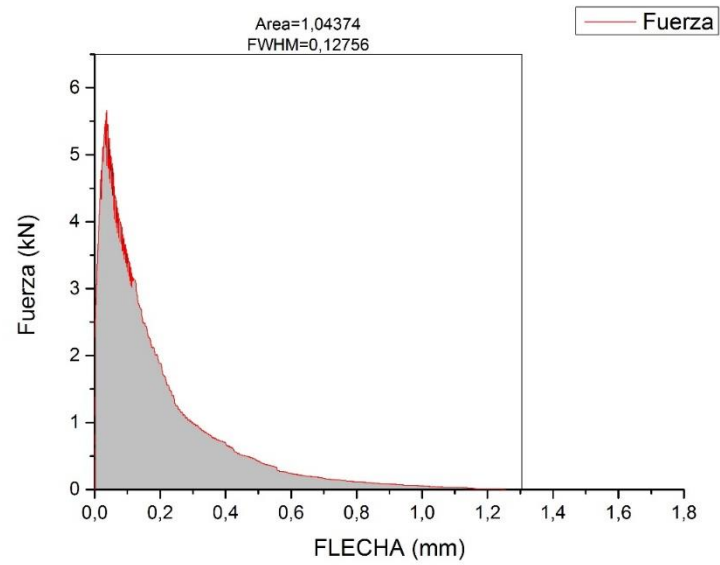
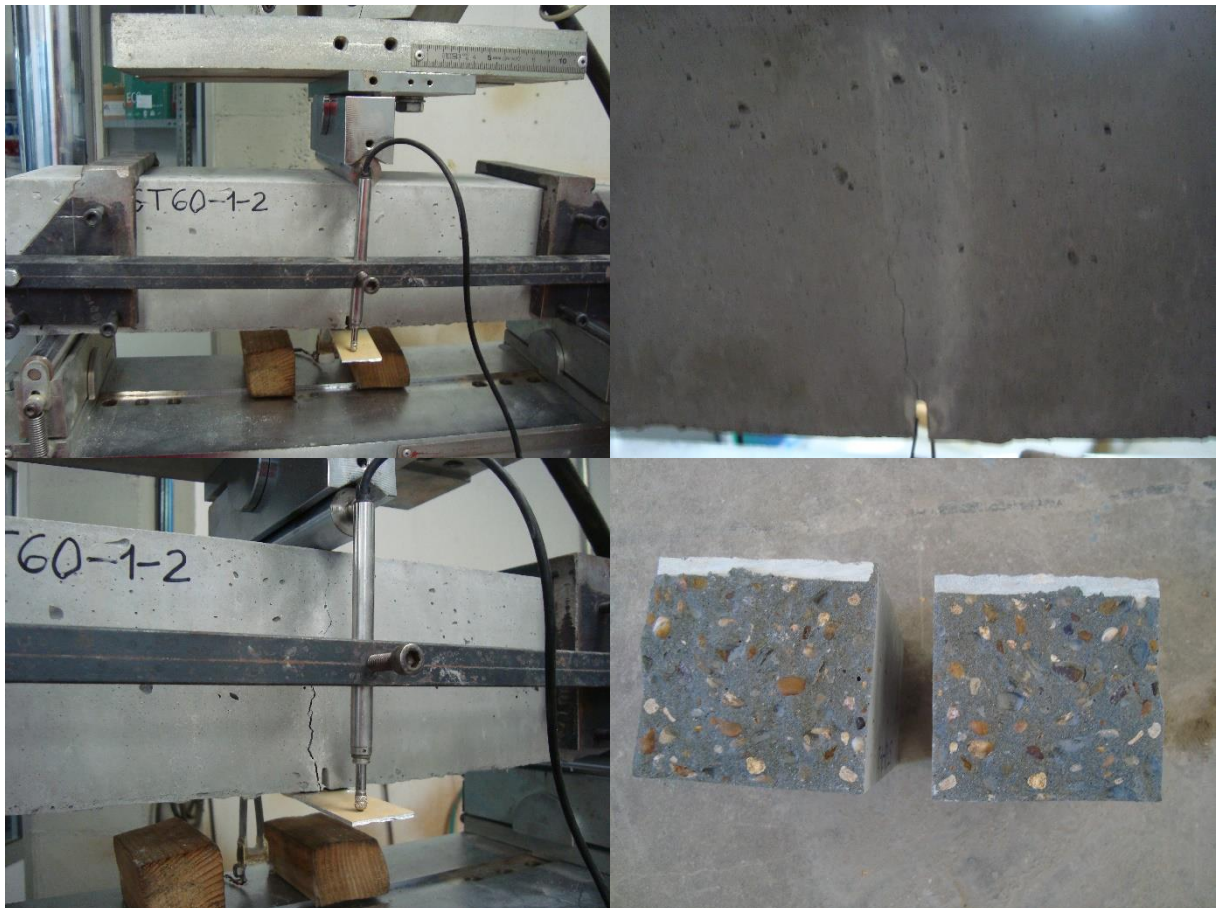


Ilustración 4-146. Fotografías del ensayo de energía de fractura de AML_ST_60_1_2



AML ST 60 1 3

- $W_{f0.1}=0,80662 \text{ Nm}$
- $A_{lig}=0,009 \text{ m}^2$
- $G_{f0.1}=89,32 \text{ N/m}$

Ilustración 4-147. Gráfica P- δ y valor de $W_{f0.1}$ de la muestra AML_ST_60_1_3

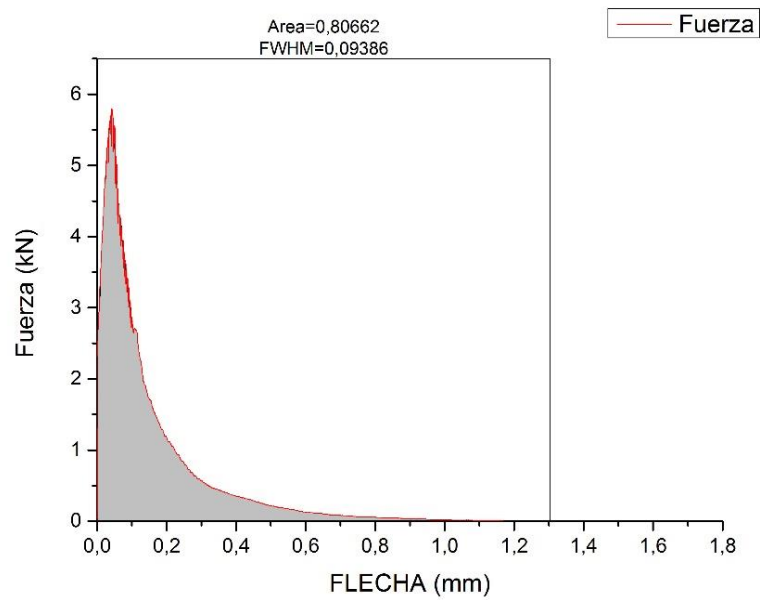


Ilustración 4-148. Fotografías del ensayo de energía de fractura de AML_ST_60_1_3



AML ST 60 1 4

- $W_{f0.1}=1,24949 \text{ Nm}$
- $A_{lig}=0,009 \text{ m}^2$
- $G_{f0.1}=138,83 \text{ N/m}$

Ilustración 4-149. Gráfica P- δ y valor de $W_{f0.1}$ de la muestra AML_ST_60_1_4

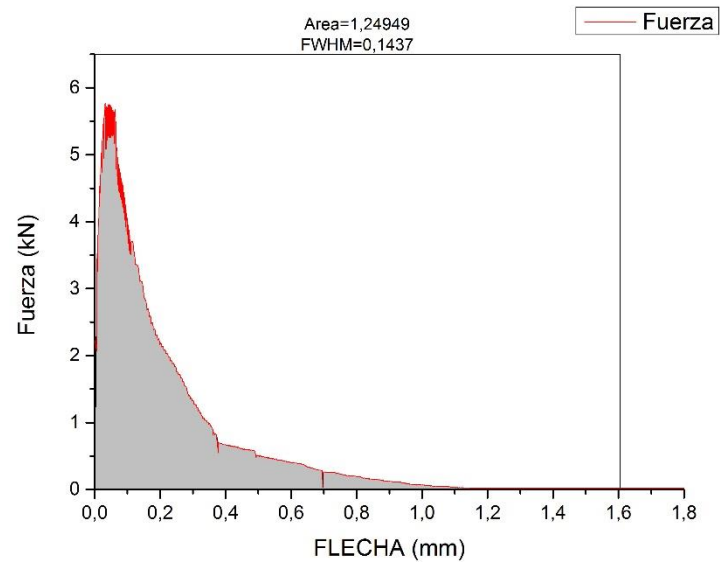


Ilustración 4-150. Fotografías del ensayo de energía de fractura de AML_ST_60_1_4



Realizando el promedio de las energías de fractura locales de cada probeta obtenemos el dato que utilizaremos para hallar la independiente al tamaño. La media de los resultados nos aporta un valor de $G_{f0.1}$ de 113,46 N/m con una desviación típica relativa de 17,88%.

AML ST 60 6 1

- $W_{f0,6}=0,56129 \text{ Nm}$
- $A_{lig}=0,004 \text{ m}^2$
- $G_{f0,6}=140,3225 \text{ N/m}$

Ilustración 4-151. Gráfica P- δ y valor de $W_{f0,6}$ de la muestra AML_ST_60_6_1

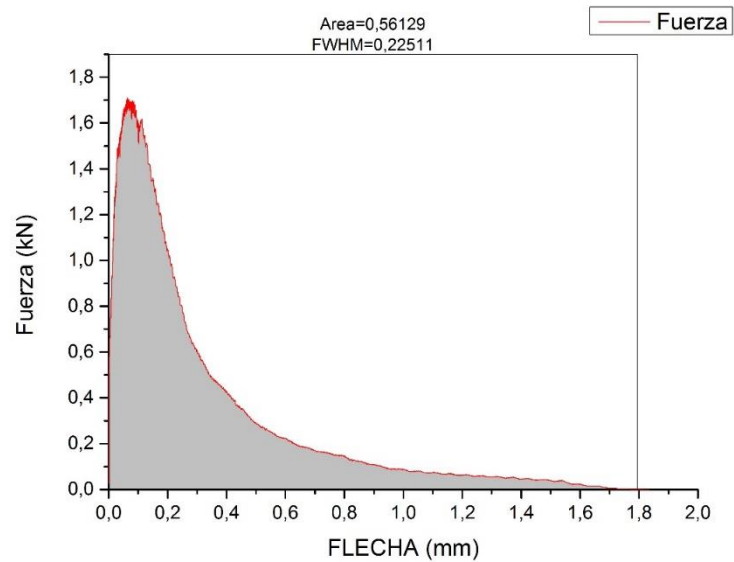
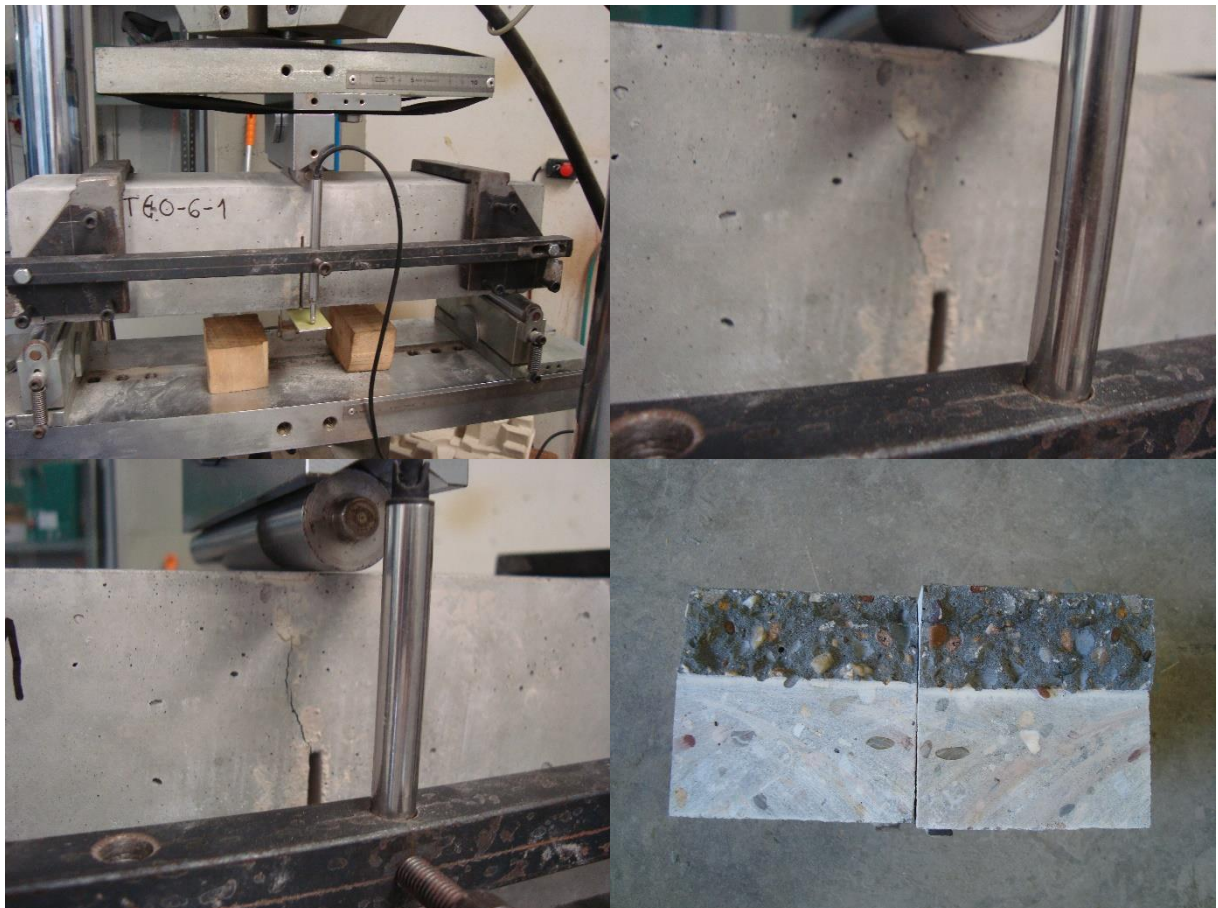


Ilustración 4-152. Fotografías del ensayo de energía de fractura de AML_ST_60_6_1



AML ST 60 6 3

- $W_{f0.6}=0,41632 \text{ Nm}$
- $A_{lig}=0,004 \text{ m}^2$
- $G_{f0.6}=104,08 \text{ N/m}$

Ilustración 4-153. Gráfica P- δ y valor de $W_{f0.6}$ de la muestra AML_ST_60_6_3

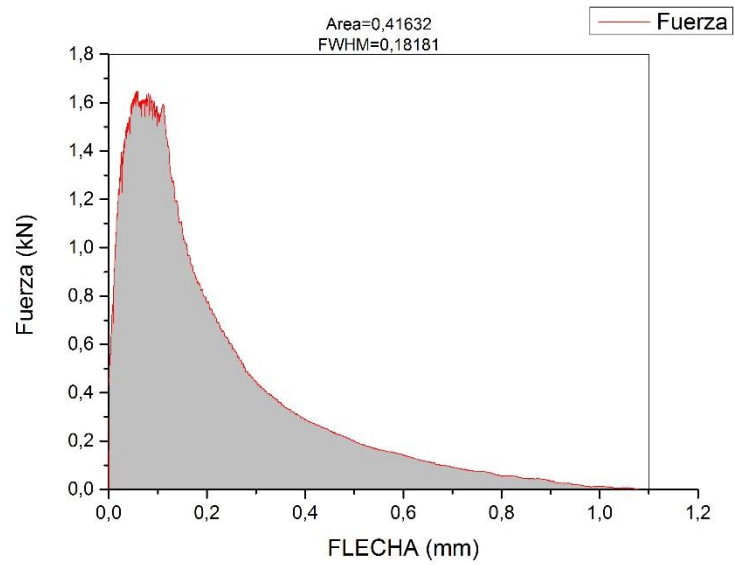


Ilustración 4-154. Fotografías del ensayo de energía de fractura de AML_ST_60_6_3



AML ST 60 6 4

- $W_{f0.6}=0,33896 \text{ Nm}$
- $A_{lig}=0,004 \text{ m}^2$
- $G_{f0.6}=84,74 \text{ N/m}$

Ilustración 4-155. Gráfica P- δ y valor de $W_{f0.6}$ de la muestra AML_ST_60_6_4

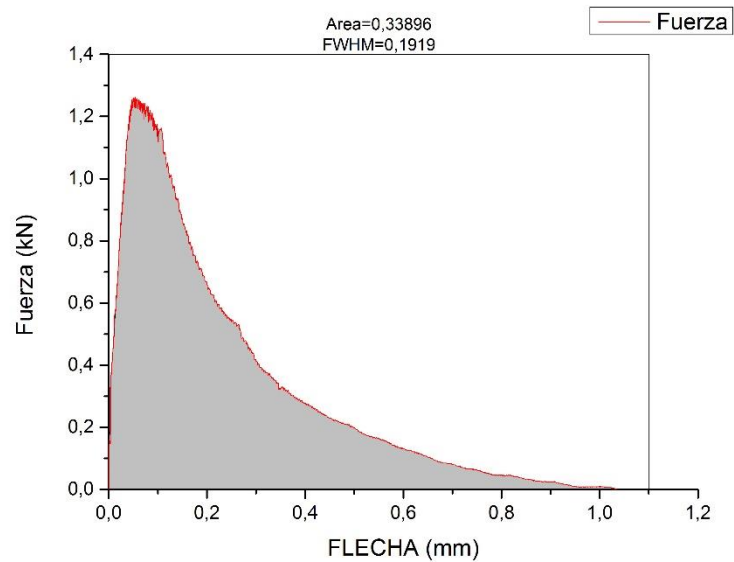


Ilustración 4-156. Fotografías del ensayo de energía de fractura de AML_ST_60_6_4



Realizando el promedio de las energías de fractura locales de cada probeta obtenemos el dato que utilizaremos para hallar la independiente al tamaño. La media de los resultados nos aporta un valor de $G_{f0,6}$ de 109,45 N/m con una desviación típica relativa de 25,72%.

Con los datos de $G_{f0,1}$ y $G_{f0,6}$ ya se está en disposición de hallar G_F y a_f :

- $G_F=116,45$
- $a_f=4,63$ mm

HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE 9 PA·S Y 80 MPA

Desafortunadamente en este espacio muestral, 4 de las probetas fueron desechadas ya sea por mala ejecución de las entallas o por una mala praxis del ensayo como la colocación de la carga desviada con respecto a la entalla, obteniendo así un valor ficticio de la energía de fractura. Así las muestras válidas para el análisis experimental serán:

- AML_ST_80_1_2
- AML_ST_80_1_3
- AML_ST_80_1_4
- AML_ST_80_6_2

AML ST 80 1 2

- $W_{f0.1}=1,53934$ Nm
- $A_{lig}=0,009$ m²
- $G_{f0.1}=171,04$ N/m

Ilustración 4-157. Gráfica P- δ y valor de $W_{f0.1}$ de la muestra AML_ST_80_1_2

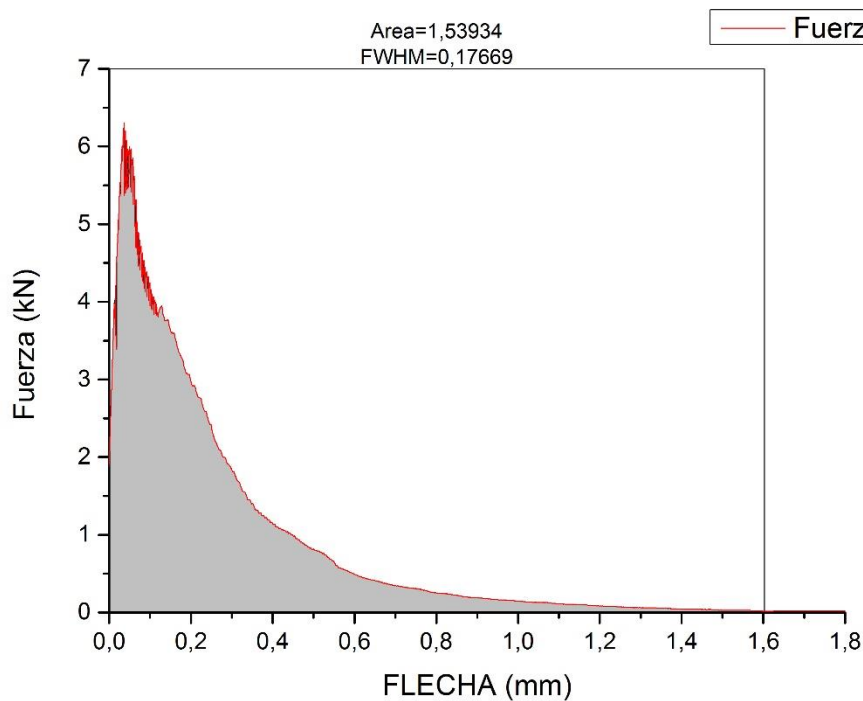


Ilustración 4-158. Fotografías del ensayo de energía de fractura de AML_ST_80_1_2



AML ST 80 1 3

- $W_{f0.1}=1,08892 \text{ Nm}$
- $A_{lig}=0,009 \text{ m}^2$
- $G_{f0.1}=120,99 \text{ N/m}$

Ilustración 4-159. Gráfica P- δ y valor de $W_{f0.1}$ de la muestra AML_ST_80_1_3

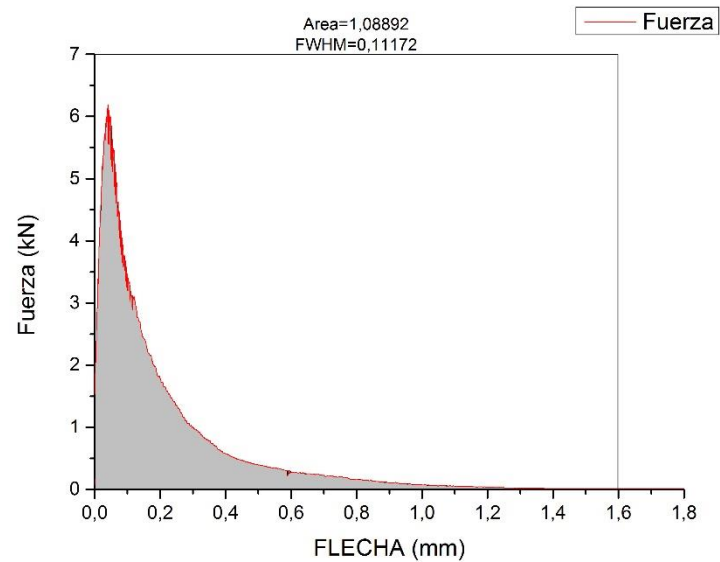


Ilustración 4-160. Fotografías del ensayo de energía de fractura de AML_ST_80_1_3



AML ST 80 1 4

- $W_{f0.1}=1,05567 \text{ Nm}$
- $A_{lig}=0,009 \text{ m}^2$
- $G_{f0.1}=117,30 \text{ N/m}$

Ilustración 4-161. Gráfica P- δ y valor de $W_{f0.1}$ de la muestra AML_ST_80_1_4

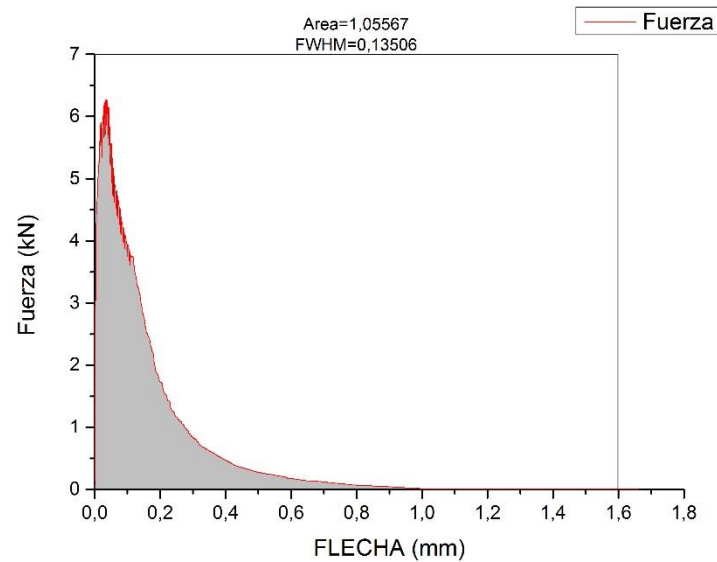
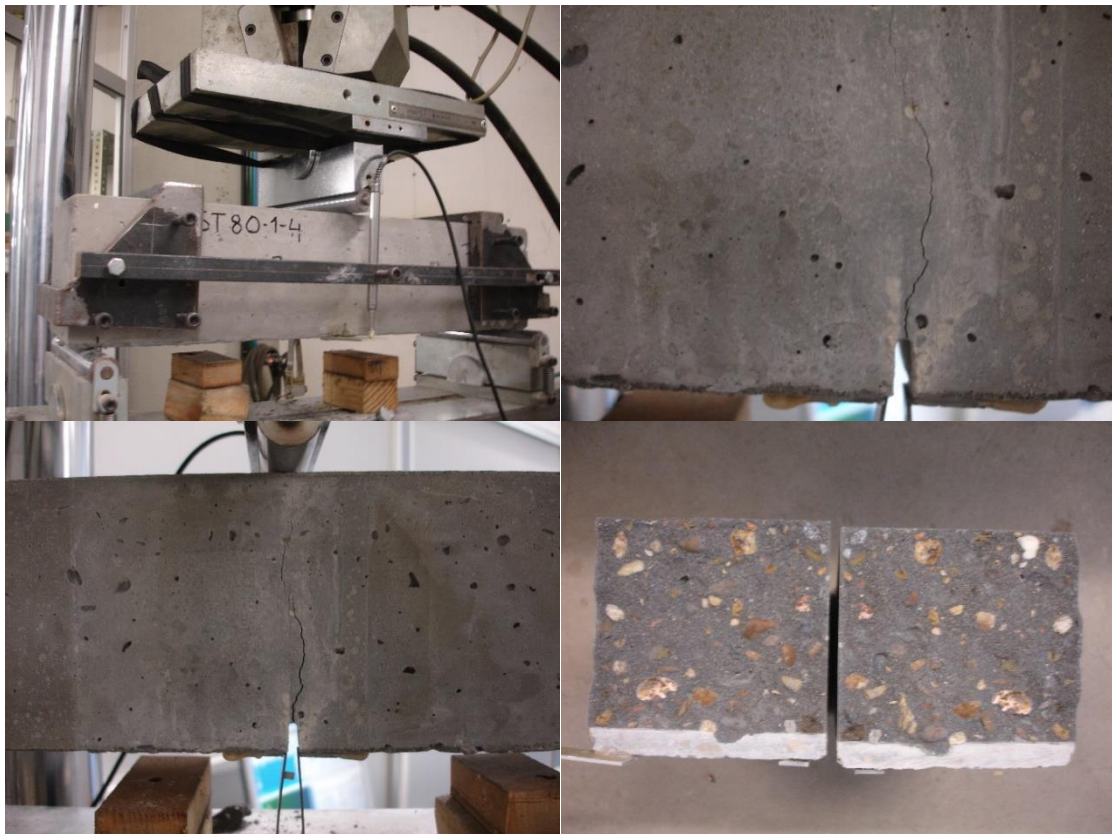


Ilustración 4-162. Fotografías del ensayo de energía de fractura de AML_ST_80_1_4



Realizando el promedio de las energías de fractura locales de cada probeta obtenemos el dato que utilizaremos para hallar la independiente al tamaño. La media de los resultados nos aporta un valor de $G_{f0.1}$ de 136,44 N/m con una desviación típica relativa de 22,00%.

AML ST 80 6 2

- $W_{f0.6}=0,52764\text{Nm}$
- $A_{lig}=0,004\text{ m}^2$
- $G_{f0.6}=131,91\text{ N/m}$

Ilustración 4-163. Gráfica P- δ y valor de $W_{f0.6}$ de la muestra AML_ST_80_6_2

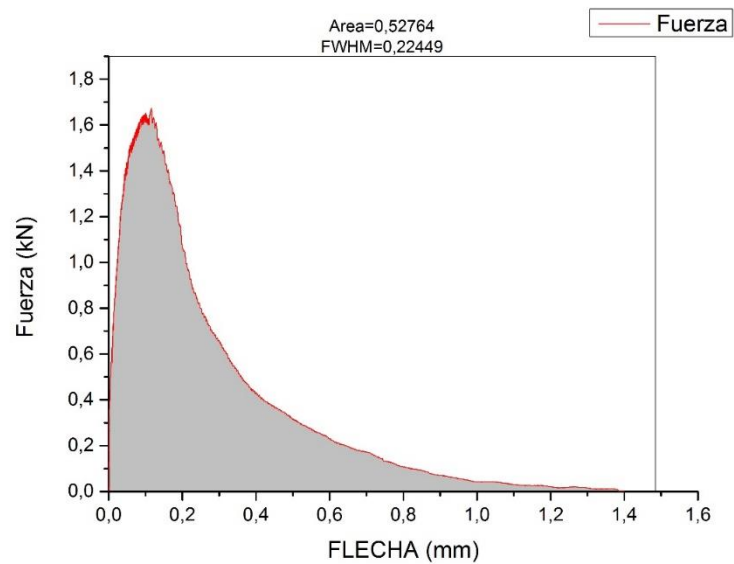
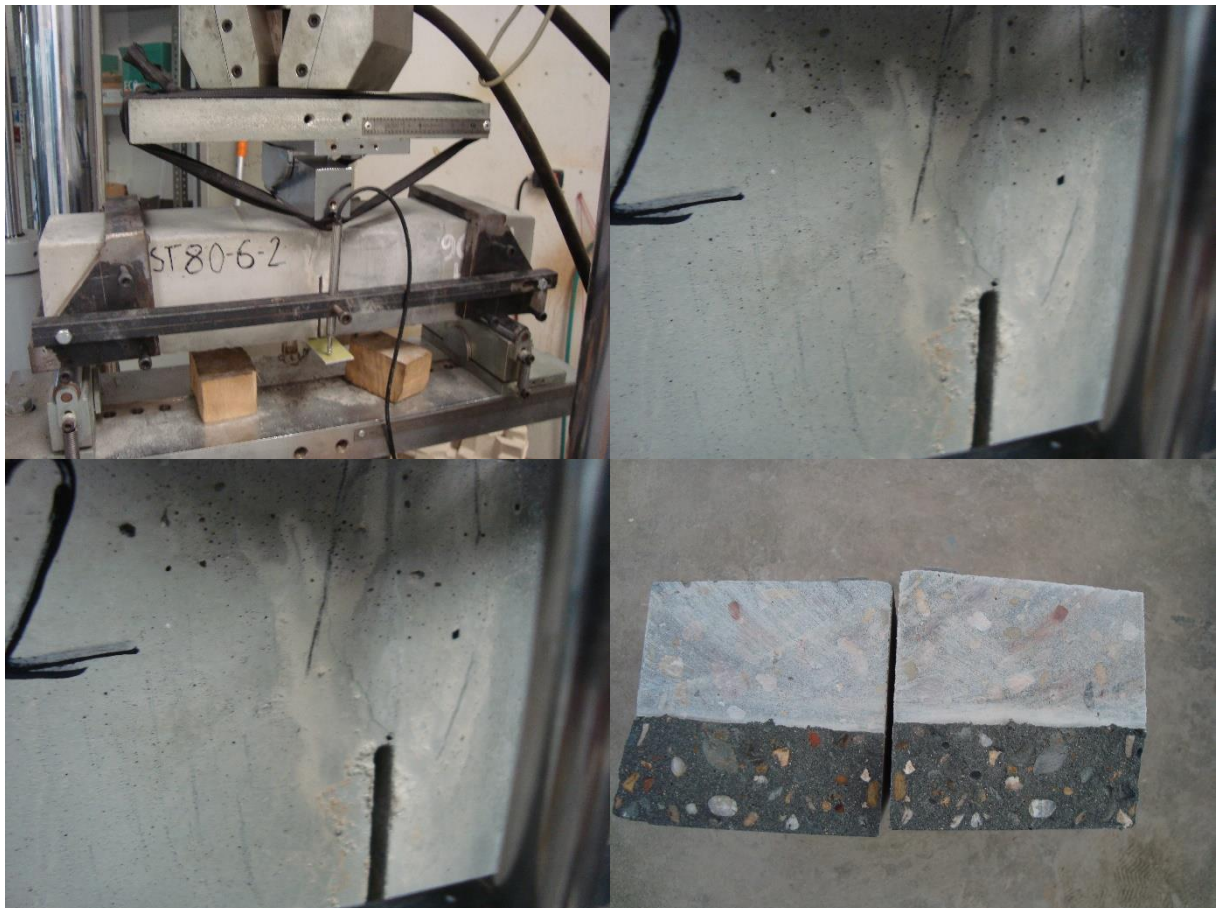


Ilustración 4-164. Fotografías del ensayo de energía de fractura de AML_ST_80_6_2



Con los datos de $G_{f0.1}$ y $G_{f0.6}$ ya se está en disposición de hallar G_F y a_I :

- $G_F=140,07$
- $a_I=4,66$ mm

4.6 Ensayo de tenacidad para hormigón con fibras de acero

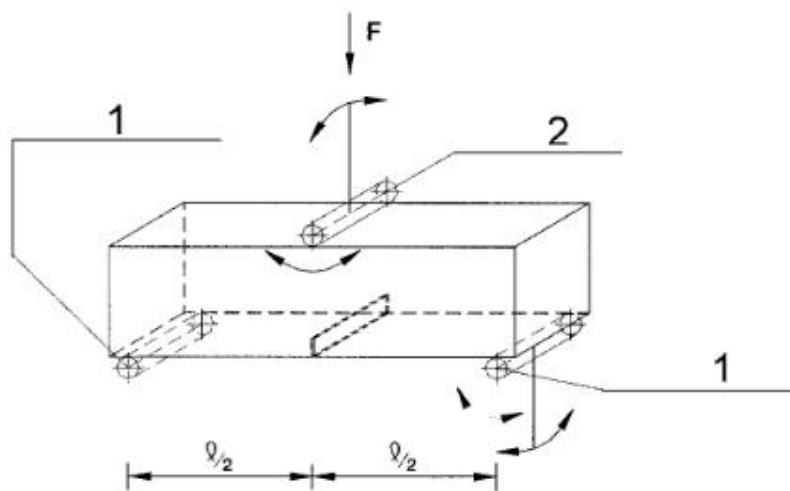
Para estudiar la tenacidad del hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero se utilizará la norma UNE-EN 14651:2007+A1 [31], Esta norma europea especifica un método de determinación de la resistencia a la tracción por flexión del hormigón con fibras metálicas sobre probetas moldeadas. El método permite determinar:

- Límite de proporcionalidad (LOP): tensión en el fondo de entalla que se supone que actúa en una sección no agrietada del centro de vano de un prisma sometido a una carga puntual centrada F_L .
- Resistencia residual a la tracción por flexión: tensión ficticia en el fondo de la entalla que se supone actúa en una sección no agrietada en el centro de vano de un prisma sometido a una carga puntual centrada F_j correspondiente a $CMOD_j$ donde $CMOD_j < CMOD_{FL}$. Siendo $CMOD$ el desplazamiento del borde de la fisura.

El comportamiento a tracción del hormigón con fibras metálicas se evalúa en términos de valores de la resistencia residual a la tracción por flexión determinados a partir de la curva carga desplazamiento del borde de la fisura o de la curva carga-flecha, obtenida aplicando una carga puntual sobre un prisma con entalla simplemente apoyado.

Se necesitará una máquina de ensayo capaz de reproducir una velocidad de desplazamiento constante así como un dispositivo que permite transmitir la carga de la máquina de ensayo a la probeta, compuesto por dos rodillos de apoyo, en los ensayos realizados conforman un vano de 436 mm, y un rodillo de carga. También se tendrán que registrar los desplazamientos mediante transductores colocados en un utillaje y el medidor de abertura de grieta apoyado en dos placas adheridas a la base de la entalla.

Ilustración 4-165. Configuración de la carga sobre la probeta [31]



Leyenda

- 1 Rodillo de apoyo
- 2 Rodillo de carga

Las probetas son más pequeñas que las indicadas en la norma ya que tienen 440 mm de longitud y 100 mm de anchura. Las entallas se han realizado por el método de aserrado por vía húmeda teniendo una profundidad de $1/6$ de la anchura, es decir de 16.67 mm.

El programa utilizado durante el ensayo controla la velocidad de crecimiento del $CMOD$, la máquina debe funcionar de modo que el $CMOD$ aumente a una velocidad constante de 0,05 mm/min. Cuando el $CMOD=0,1$, la máquina debe funcionar de modo que el $CMOD$ aumente a una velocidad constante de 0,2 mm/min.

LÍMITE DE PROPORCIONALIDAD

El LOP viene dado por la siguiente expresión:

$$f_{ct,L}^f = \frac{3F_L l}{2bh_{sp}^2}$$

$f_{ct,L}^f$ es el LOP, newtons por milímetro cuadrado

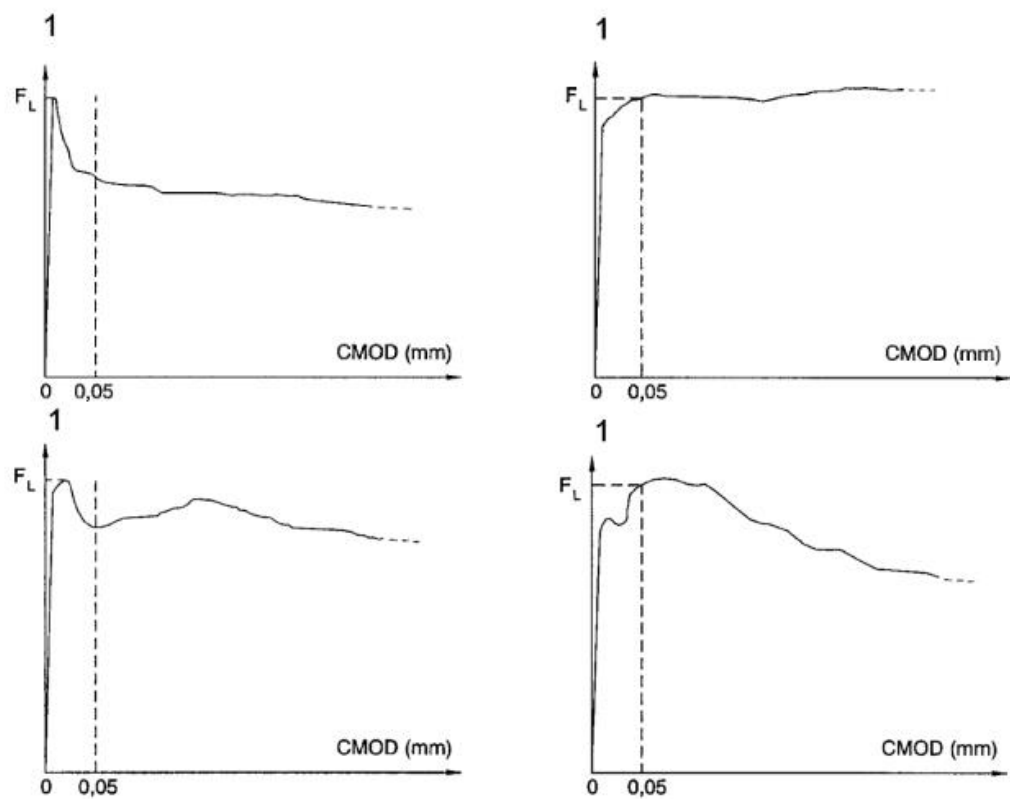
F_L es la carga correspondiente al LOP, en newtons

l es la longitud del vano, en milímetros

b es la anchura de la probeta en milímetros

h_{sp} es la distancia entre el fondo de la entalla y la parte superior de la probeta, en milímetros

Ilustración 4-166. Diagramas de carga-CMOD y F_L



Leyenda

1 Carga F

RESISTENCIA RESIDUAL A LA TRACCIÓN POR FLEXIÓN

La resistencia residual a la tracción por flexión $f_{R,j}$ viene dada por la siguiente expresión:

$$f_{R,j} = \frac{3F_j l}{2bh_{sp}^2}$$

$f_{R,j}$ es la resistencia residual a la tracción por flexión, correspondiente a $CMOD=CMOD_j$ en newtons por milímetro cuadrado

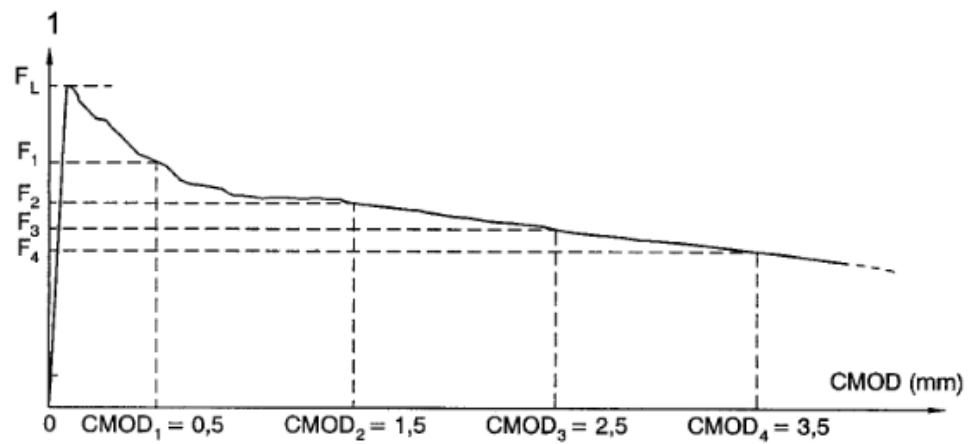
F_j es la carga correspondiente a $CMOD=CMOD_j$ en newtons

l es la longitud del vano, en milímetros

b es la anchura de la probeta en milímetros

h_{sp} es la distancia entre el fondo de la entalla y la parte superior de la probeta, en milímetros

Ilustración 4-167. Diagrama carga-CMOD y F_j



Leyenda

1 Carga F

HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO 60 PA·S Y 40 MPA

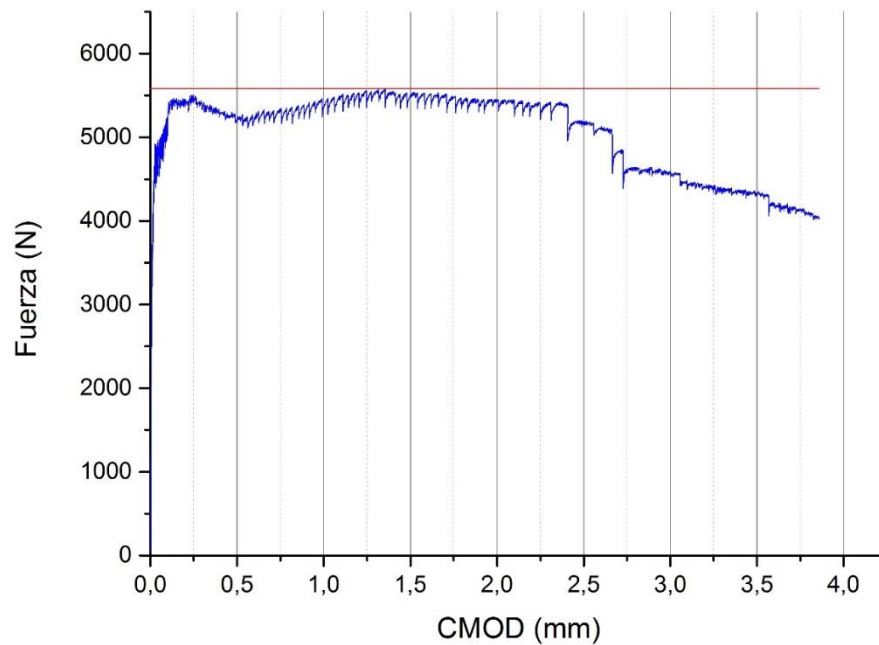
A continuación se detallarán los resultados de las 4 probetas prismáticas ensayadas:

AML ST 40F 1

Tras realizar el ensayo se obtienen las siguientes cargas:

- $F_L=5583$ N
- $F_1=5217$ N
- $F_2=5501$ N
- $F_3=5190$ N
- $F_4=4331$ N

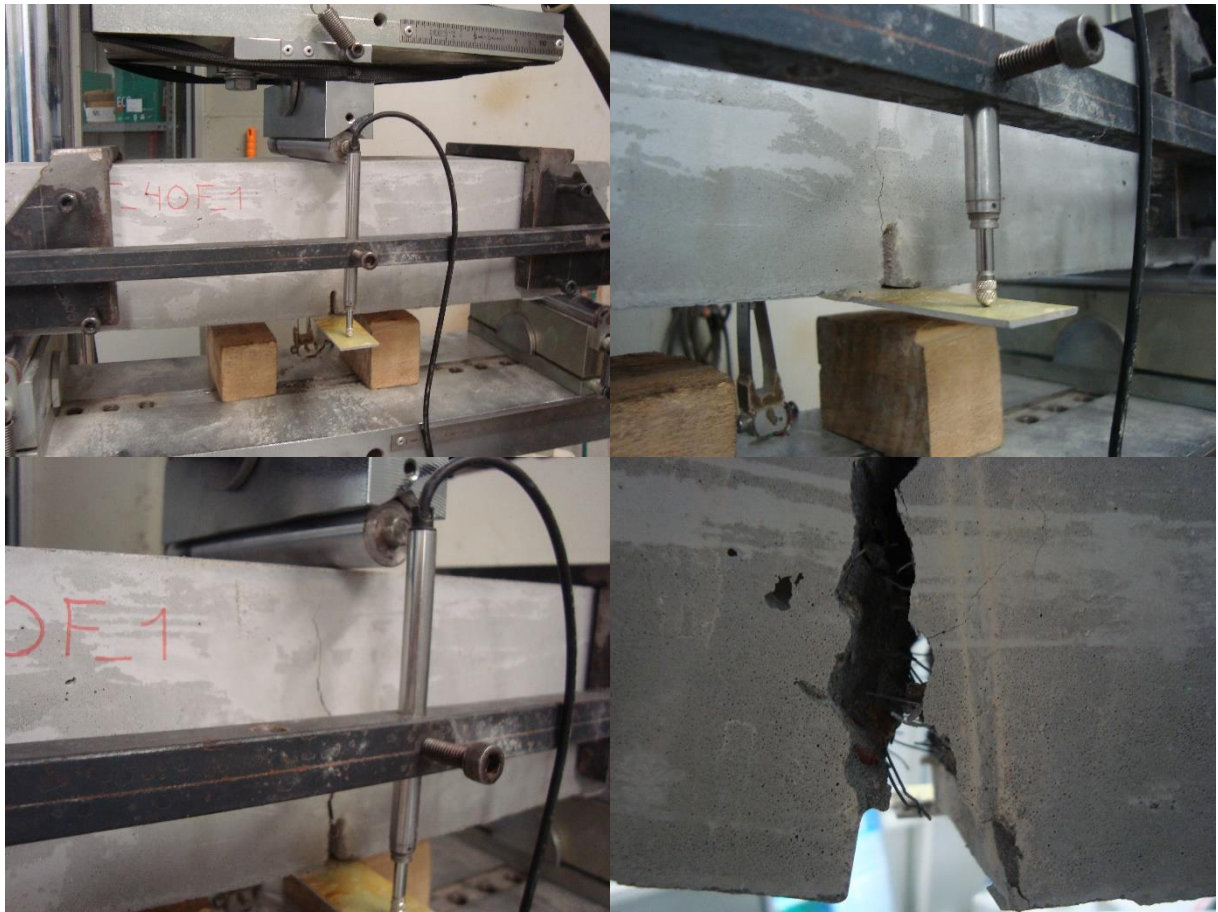
Ilustración 4-168. Diagrama de carga-CMOD de AML_ST_40F_1



Con estos datos se halla el LOP y las resistencias residuales:

- $f_{ct,L}^f=5,29$ N/mm²
- $f_{R,1}=4,91$ N/mm²
- $f_{R,2}=5,18$ N/mm²
- $f_{R,3}=4,89$ N/mm²
- $f_{R,4}=4,08$ N/mm²

Ilustración 4-169. Fotografías del ensayo de tenacidad de AML_ST_40F_1

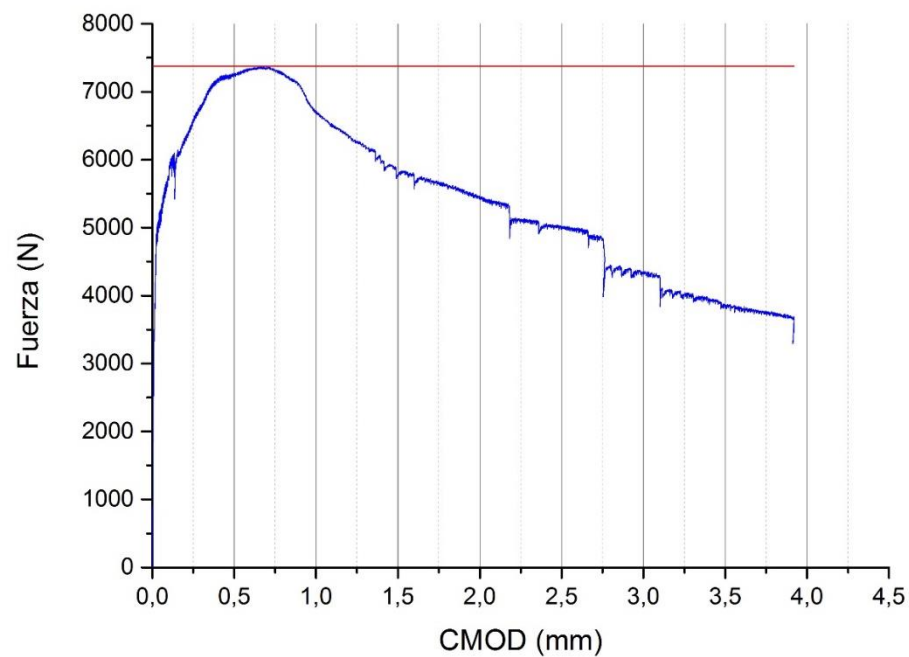


AML ST 40F 2

Tras realizar el ensayo se obtienen las siguientes cargas:

- $F_L=7378$ N
- $F_1=7276$ N
- $F_2=5770$ N
- $F_3=5013$ N
- $F_4=3862$ N

Ilustración 4-170. Diagrama de carga-CMOD de AML_ST_40F_2



Con estos datos se halla el LOP y las resistencias residuales:

- $f_{ct,L}^f=6,95$ N/mm²
- $f_{R,1}=6,85$ N/mm²
- $f_{R,2}=5,43$ N/mm²
- $f_{R,3}=4,72$ N/mm²
- $f_{R,4}=3,64$ N/mm²

Ilustración 4-171. Fotografías del ensayo de tenacidad de AML_ST_40F_2

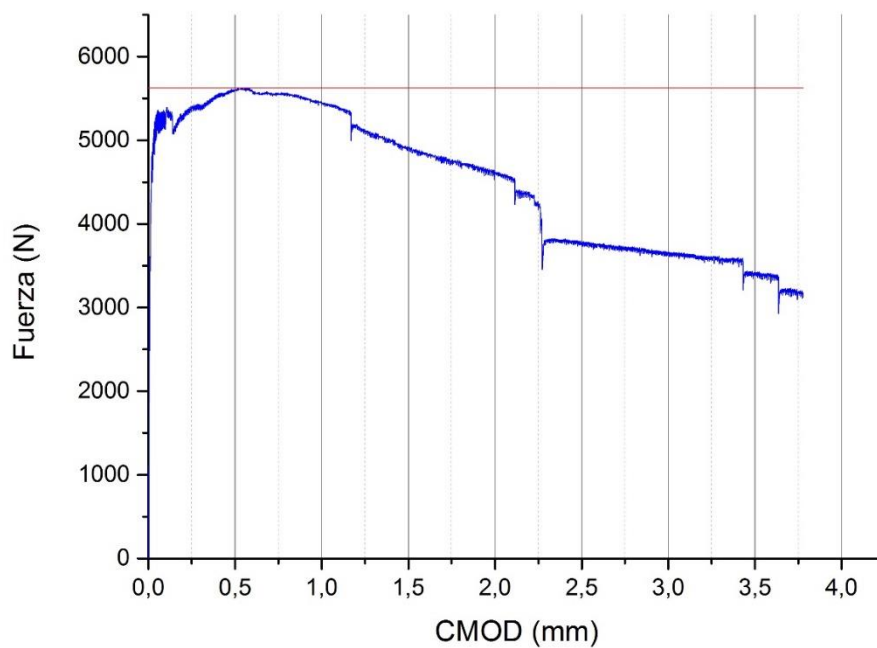


AML ST 40F 3

Tras realizar el ensayo se obtienen las siguientes cargas:

- $F_L=5626$ N
- $F_1=5594$ N
- $F_2=4912$ N
- $F_3=3774$ N
- $F_4=3423$ N

Ilustración 4-172. Diagrama de carga-CMOD de AML_ST_40F_3



Con estos datos se halla el LOP y las resistencias residuales:

- $f_{ct,L}^f=5,30$ N/mm²
- $f_{R,1}=5,27$ N/mm²
- $f_{R,2}=4,63$ N/mm²
- $f_{R,3}=3,55$ N/mm²
- $f_{R,4}=3,22$ N/mm²

Ilustración 4-173. Fotografías del ensayo de tenacidad de AML_ST_40F_3

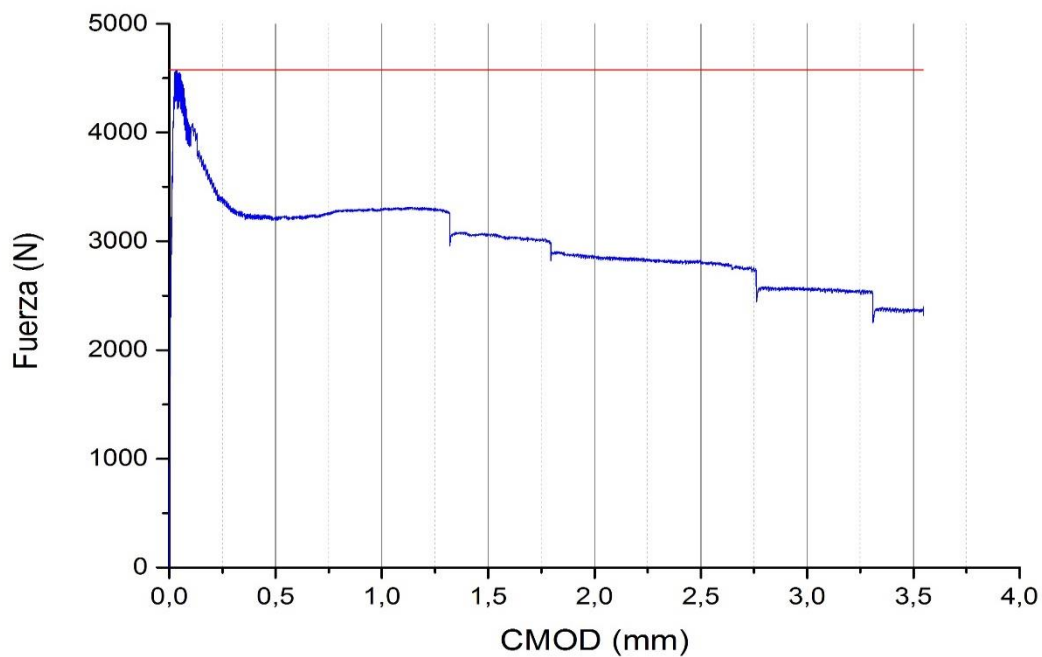


AML ST 40F 4

Tras realizar el ensayo se obtienen las siguientes cargas:

- $F_L=4576$ N
- $F_1=3223$ N
- $F_2=3058$ N
- $F_3=2791$ N
- $F_4=2365$ N

Ilustración 4-174. Diagrama de carga-CMOD de AML_ST_40F_4



Con estos datos se halla el LOP y las resistencias residuales:

- $f_{ct,L}^f=4,31$ N/mm²
- $f_{R,1}=3,04$ N/mm²
- $f_{R,2}=2,88$ N/mm²
- $f_{R,3}=2,63$ N/mm²
- $f_{R,4}=2,23$ N/mm²

Ilustración 4-175. Fotografías del ensayo de tenacidad de AML_ST_40F_4



La media de los resultados en newtons y newtons por milímetro cuadrado y su desviación típica relativa se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4-7. Tabla de datos estadísticos de las muestras de hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero 60 Pa·s y 40MPa

F_L	F_1	F_2	F_3	F_4	$f_{ct,L}^f$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
5790,75	5327,50	4810,25	4192,00	3495,25	5,45	5,02	4,53	3,95	3,29
20,10%	31,24%	25,40%	26,87%	24,03%	20,10%	31,24%	25,40%	26,87%	24,03%

HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO 60 PA·S Y 60 MPA

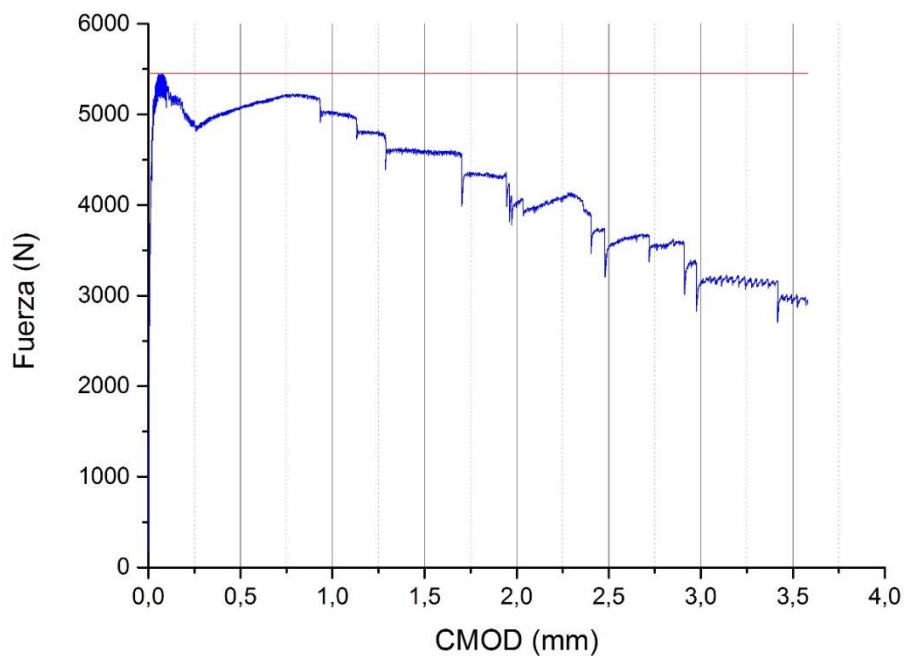
De esta amasada se realizaron también 4 probetas pero la muestra AML_ST_60F_1 fue ensayada de forma errónea por lo que no será incluida en el análisis.

AML ST 60F 2

Tras realizar el ensayo se obtienen las siguientes cargas:

- $F_L=5454$ N
- $F_1=5074$ N
- $F_2=4576$ N
- $F_3=3534$ N
- $F_4=2957$ N

Ilustración 4-176. Diagrama de carga-CMOD de AML_ST_60F_2



Con estos datos se halla el LOP y las resistencias residuales:

- $f_{ct,L}^f=5,14$ N/mm²
- $f_{R,1}=4,78$ N/mm²
- $f_{R,2}=4,31$ N/mm²
- $f_{R,3}=3,33$ N/mm²
- $f_{R,4}=2,79$ N/mm²

Ilustración 4-177. Fotografías del ensayo de tenacidad de AML_ST_60F_2

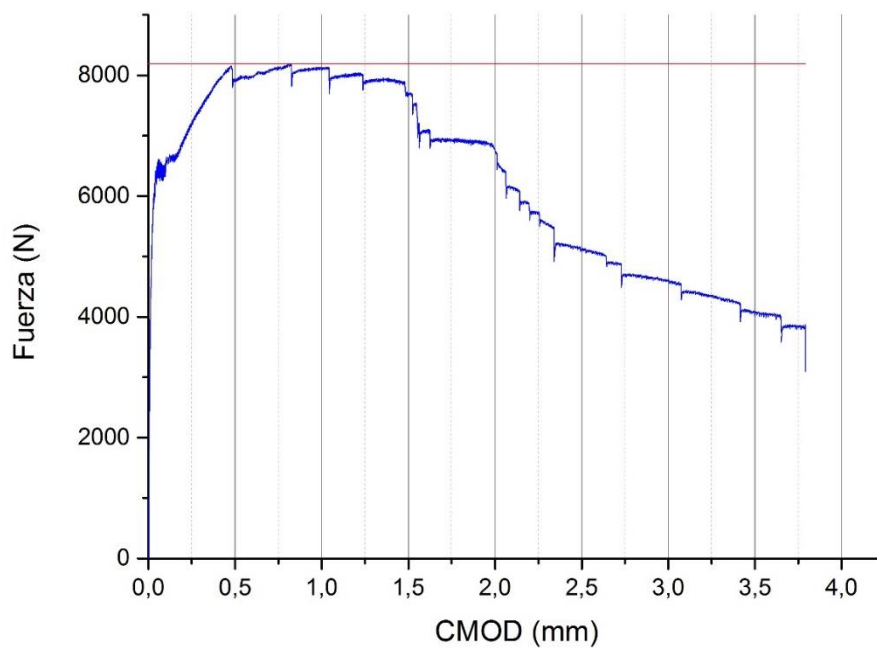


AML ST 60F 3

Tras realizar el ensayo se obtienen las siguientes cargas:

- $F_L=8196$ N
- $F_1=7889$ N
- $F_2=7706$ N
- $F_3=5112$ N
- $F_4=4060$ N

Ilustración 4-178. Diagrama de carga-CMOD de AML_ST_60F_3



Con estos datos se halla el LOP y las resistencias residuales:

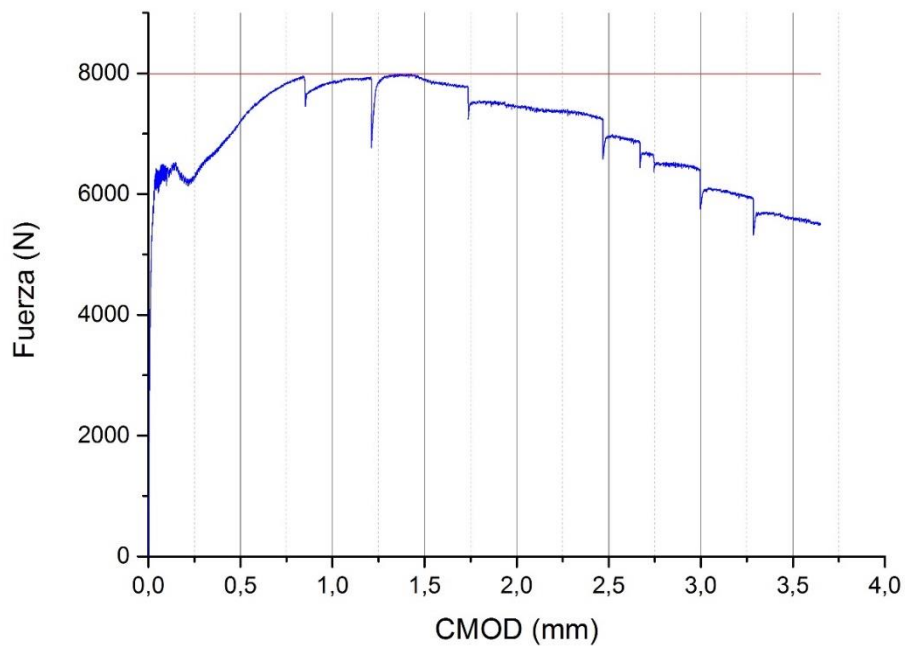
- $f_{ct,L}^f=7,72$ N/mm²
- $f_{R,1}=7,43$ N/mm²
- $f_{R,2}=7,26$ N/mm²
- $f_{R,3}=4,81$ N/mm²
- $f_{R,4}=3,82$ N/mm²

AML ST 60F 4

Tras realizar el ensayo se obtienen las siguientes cargas:

- $F_L=7994$ N
- $F_1=7199$ N
- $F_2=7909$ N
- $F_3=6935$ N
- $F_4=5617$ N

Ilustración 4-179. Diagrama de carga-CMOD de AML_ST_60F_4



Con estos datos se halla el LOP y las resistencias residuales:

- $f_{ct,L}^f=7,53$ N/mm²
- $f_{R,1}=4,78$ N/mm²
- $f_{R,2}=7,45$ N/mm²
- $f_{R,3}=6,53$ N/mm²
- $f_{R,4}=5,29$ N/mm²

Ilustración 4-180. Fotografías del ensayo de tenacidad de AML_ST_60F_4



La media de los resultados en newtons y newtons por milímetro cuadrado y su desviación típica relativa se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4-8. Tabla de datos estadísticos de las muestras de hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero 60 Pa·s y 60MPa

F_L	F_1	F_2	F_3	F_4	$f_{ct,L}^f$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
7214,67	6720,67	6730,33	5193,667	4211,33	6,80	6,33	6,34	4,89	3,97
21,18%	21,83%	27,76%	32,77%	31,73%	21,18%	21,83%	27,76%	32,77%	31,73%

HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO 60 PA·S Y 80 MPA

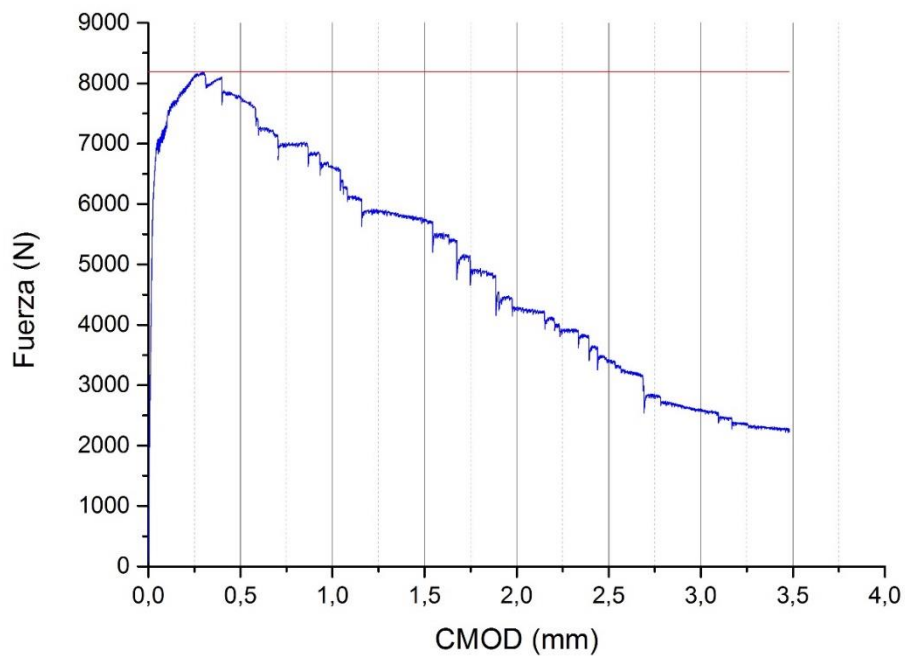
A continuación se detallarán los resultados de las 4 probetas prismáticas ensayadas:

AML ST 80F 1

Tras realizar el ensayo se obtienen las siguientes cargas:

- $F_L=8194$ N
- $F_1=7746$ N
- $F_2=5722$ N
- $F_3=3409$ N
- F_4 =No se pudo recoger muestra del CMOD de valor 3,5 mm.

Ilustración 4-181. Diagrama de carga-CMOD de AML_ST_80F_1



Con estos datos se halla el LOP y las resistencias residuales:

- $f_{ct,L}^f=7,72$ N/mm²
- $f_{R,1}=7,30$ N/mm²
- $f_{R,2}=5,39$ N/mm²
- $f_{R,3}=3,21$ N/mm²

Ilustración 4-182. Fotografías del ensayo de tenacidad de AML_ST_80F_1

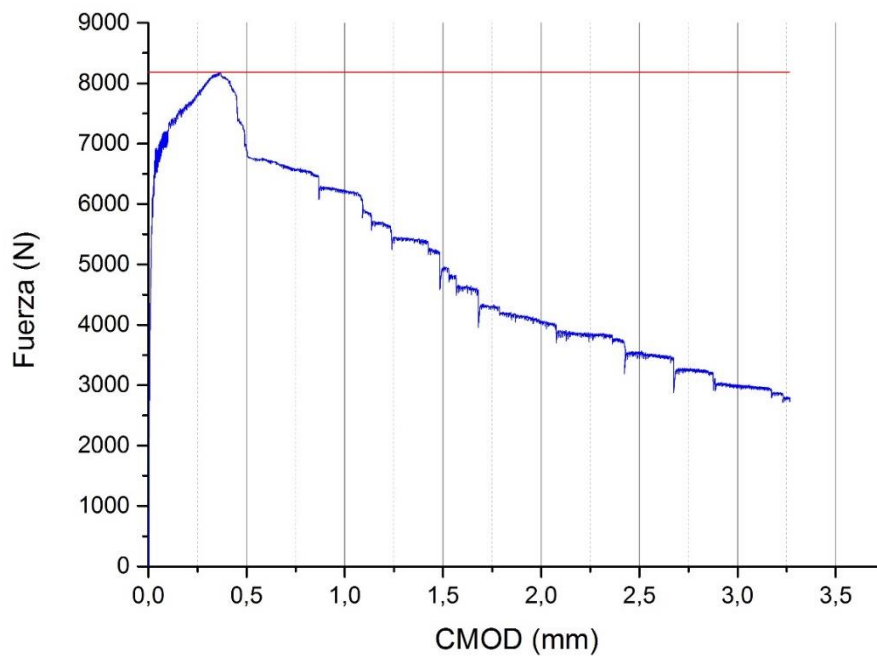


AML ST 80F 2

Tras realizar el ensayo se obtienen las siguientes cargas, aunque la fractura ha sido extraña y tortuosa en una de las caras:

- $F_L=8187$ N
- $F_1=6897$ N
- $F_2=4868$ N
- $F_3=3441$ N
- F_4 =No se pudo recoger muestra del CMOD de valor 3,5 mm.

Ilustración 4-183. Diagrama de carga-CMOD de AML_ST_80F_2



Con estos datos se halla el LOP y las resistencias residuales:

- $f_{ct,L}^f=7,71$ N/mm²
- $f_{R,1}=6,50$ N/mm²
- $f_{R,2}=4,58$ N/mm²
- $f_{R,3}=3,24$ N/mm²

Ilustración 4-184. Fotografías del ensayo de tenacidad de AML_ST_80F_2

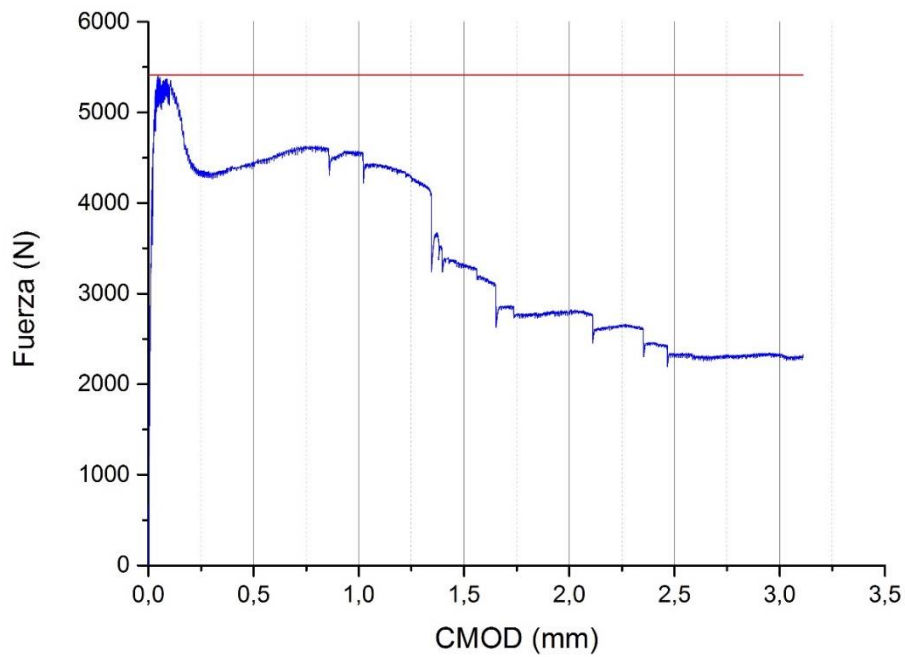


AML ST 80F 3

Tras realizar el ensayo se obtienen las siguientes cargas:

- $F_L=5416$ N
- $F_1=4442$ N
- $F_2=3316$ N
- $F_3=2295$ N
- F_4 =No se pudo recoger muestra del CMOD de valor 3,5 mm.

Ilustración 4-185. Diagrama de carga-CMOD de AML_ST_80F_3



Con estos datos se halla el LOP y las resistencias residuales:

- $f_{ct,L}^f=5,10$ N/mm²
- $f_{R,1}=4,18$ N/mm²
- $f_{R,2}=3,12$ N/mm²
- $f_{R,3}=2,16$ N/mm²

Ilustración 4-186. Fotografías del ensayo de tenacidad de AML_ST_80F_3

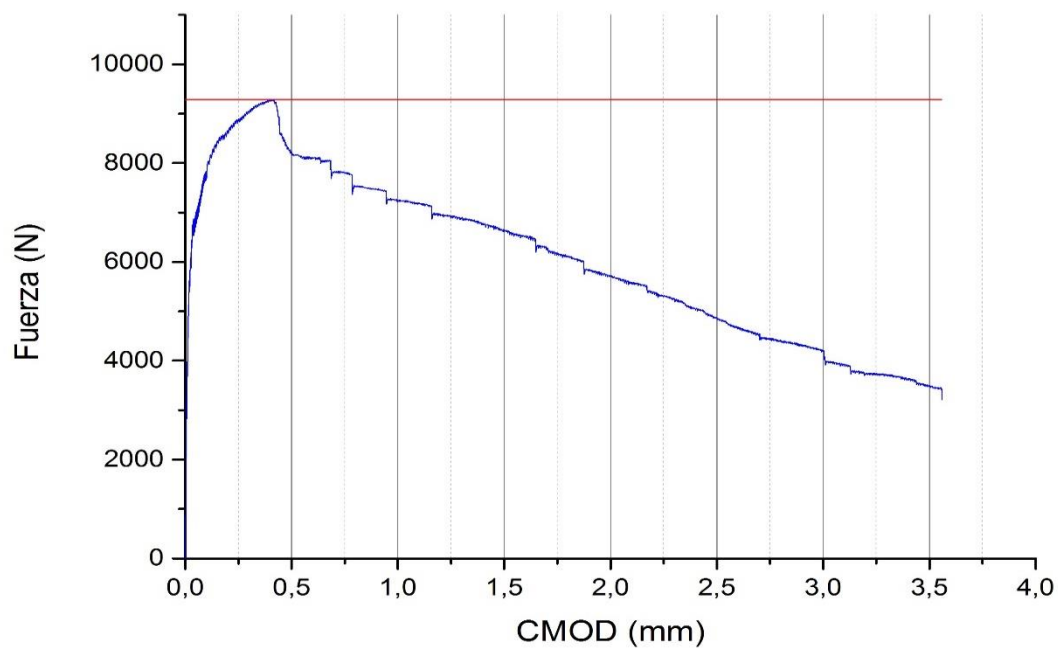


AML ST 80F 4

Tras realizar el ensayo se obtienen las siguientes cargas:

- $F_L=9284$ N
- $F_1=8220$ N
- $F_2=6639$ N
- $F_3=4871$ N
- $F_4=3481$ N.

Ilustración 4-187. Diagrama de carga-CMOD de AML_ST_80F_4



Con estos datos se halla el LOP y las resistencias residuales:

- $f_{ct,L}^f=8,74$ N/mm²
- $f_{R,1}=7,74$ N/mm²
- $f_{R,2}=6,25$ N/mm²
- $f_{R,3}=4,59$ N/mm²
- $f_{R,4}=3,29$ N/mm²

Ilustración 4-188. Fotografías del ensayo de tenacidad de AML_ST_80F_4



La media de los resultados en newtons y newtons por milímetro cuadrado y su desviación típica relativa se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4-9. Tabla de datos estadísticos de las muestras de hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero 60 Pa·s y 80MPa

F_L	F_1	F_2	F_3	F_4	$f_{ct,L}^f$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
7770,25	6826,25	5136,25	3504	3481	7,32	6,43	4,84	3,30	3,28
21,26%	24,63%	27,50%	30,13%	-	21,26%	24,63%	27,50%	30,13%	-

5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Tras haber realizado todo el seguimiento de las mezclas de hormigón autocompactante empleando el método de dosificación propuesto y validado por Karihaloo y haber empleado el procedimiento novedoso de adición de fibras de acero se debe llevar a cabo un análisis científico y comparativo de los resultados obtenidos.

En primer lugar la sensibilidad del hormigón al uso del superplastificante durante el hormigonado es diferente según sea el hormigón y, por tanto, la relación agua-cemento. Como es sabido, en el hormigonado influyen múltiples factores, como son la temperatura y la humedad, que se escapan del control a la hora de fabricar las múltiples amasadas. Por tanto, además de los numerosos materiales y la calidad de los mismos que se pueden utilizar, el comportamiento de los hormigones al reductor de agua es distinto, aunque podemos afirmar que dadas las condiciones en los que se han desarrollado las elaboraciones de las mezclas, es necesario añadir superplastificante sin superar la adición el 50% de lo previsto. Aún así, siempre hay que observar en cada momento la reacción que evoluciona en las amasadas pudiendo controlar en obra la cantidad a aportar. Como era de esperar, partiendo de las dosificaciones de hormigón autocompactante sin fibras, con la adición de éstas se necesita más cantidad de superplastificante ya que el refuerzo de las fibras de acero aumenta la viscosidad y dificulta la capacidad de fluir y por tanto de autocompactación.

En cuanto a las propiedades como hormigón endurecido se pueden comparar los resultados de los hormigones con y sin fibras y también entre aquellos de distinta resistencia objetivo.

Las dos amasadas de hormigones de 40 MPa de resistencia a compresión son levemente superior a este valor pero se puede afirmar que las dos presentan un comportamiento esperado en este sentido, el hormigón sin fibras con una resistencia de 46 MPa y el que presenta refuerzo de acero de 41 MPa.

Tal y como ocurre con el hormigón de 40 MPa de resistencia objetivo, los dos hormigones de resistencia teórica de 60 MPa tienen la misma resistencia a compresión aunque no es de este valor, los dos hormigones alcanzan una resistencia de 53 MPa.

En cuanto al hormigón de 80 MPa teórico, su comportamiento a compresión ha sido del todo insatisfactorio utilizando el método descrito. El hormigón sin fibras alcanza es de una resistencia a rotura de 65 MPa sin embargo el reforzado con fibras es de 55 MPa, significativamente menos resistente. Este comportamiento puede ser justificado por la interrupción de la matriz por parte de las fibras, haciéndolo mas débil en cuanto a su comportamiento a compresión se refiere. La bajada de la resistencia en ambos hormigones puede ser causada por una cantidad de filler insuficiente en la dosificación.

La resistencia a tracción indirecta de los hormigones hallada mediante el ensayo brasileño ha revelado un notable aumento en ella cuando se han introducido las fibras, presentando un comportamiento previsible.

El hormigón de 40 MPa objetivo ha aumentado en 2 MPa su resistencia a tracción indirecta, pasando de 3 a 5 MPa.

Los hormigones de 60 y 80 MPa han sufrido también un incremento pero no tan significantes como el de resistencia más baja, el de 60 ha pasado de 5 a 5,5 MPa y el 80 de 4,8 a 5,3 MPa, poniendo de manifiesto que cuanto menor es la resistencia del hormigón mayor será la evolución de su resistencia a tracción cuando se introducen fibras de acero.

El módulo elástico no varía al introducir fibras de acero, luego su pendiente en la curva tensión-deformación se mantiene constante, entre 34 y 38 GPa.

La energía de fractura independiente al tamaño (G_T) es menor cuanto menor es la resistencia obtenida, los hormigones autocompactantes de 40 MPa tienen un valor de energía de fractura de 83,28 N/m, el de 60 de 116,45 N/m y el de 80 MPa de resistencia objetivo de 140,07 N/m. También en este mismo ensayo de mecánica de la fractura se revela que la longitud de transición mayor en el de 40 MPa de resistencia, 6,77 mm y menor y a la vez similar en los hormigones de 60 y 80 MPa de 4,63 y 4,66 mm.

Por último los ensayos de tenacidad de hormigones reforzados con fibras de acero nos muestran un aumento del límite de proporcionalidad menor cuanto menor es la resistencia objetivo siendo los valores, 5,45; 6,80 y 7,32 para las mezclas de 40, 60 y 80 MPa respectivamente.

Los valores de resistencias residuales son mayores en los hormigones de mayor resistencia en los valores correspondientes a CMOD bajos, 0,5, 1,5 mm sin embargo después el valor se iguala al avanzar el crecimiento de la grieta en torno a 3 MPa.

6 CONCLUSIONES

Durante todo el transcurso del trabajo se han recogido y analizado los resultados de los ensayos realizados a los hormigones autocompactantes con y sin fibras para llegar al final del mismo extrayendo las siguientes conclusiones:

1. El método empleado ajusta la resistencia con precisión en dosificaciones con bajas resistencias a compresión y sobrevalora la resistencia en hormigones con valores mayores de 40 MPa de resistencia.
2. La adición de fibras de acero a las mezclas no aumenta la resistencia a compresión del hormigón.
3. La adición de fibras de acero al hormigón no afecta al módulo elástico del mismo.
4. Las fibras de acero mejoran el valor de la resistencia a tracción indirecta del hormigón.
5. La energía de fractura del hormigón autocompactante es mayor cuanto mayor es la resistencia objetivo de la mezcla.
6. El límite de proporcionalidad del hormigón autocompactante reforzada con fibras de acero es mayor cuanto mayor es la resistencia objetivo del mismo.
7. La resistencia residual es mayor cuanto mayor es la resistencia objetivo para valores más bajos de abertura del CMOD.

7 DESARROLLOS FUTUROS

Debido al extenso campo de la experimentación de materiales, este Trabajo deja muchas vías de investigación abiertas para el futuro.

Uno de los campos a estudiar es la influencia del filler calizo en la resistencia a compresión del hormigón autocompactante y conocer si existe un mínimo para conseguir que el método se ajuste a hormigones con mayor valor de la resistencia.

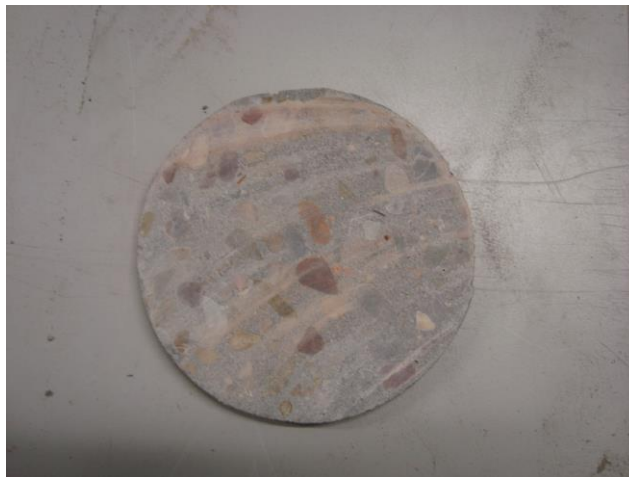
El material cementicio utilizado ha sido únicamente cemento portland, sin embargo se puede combinar con escorias de alto horno, por tanto se debería estudiar la influencia de este material en las propiedades de las mezclas.

Se pueden realizar, utilizando el mismo método, hormigones de 30, 50 y 70 MPa de resistencia objetivo para aumentar el rango de estudio del Trabajo.

Realizar nuevos análisis a dosificaciones con distinta viscosidad e intentar relacionar la cantidad de superplastificante utilizado con dichos valores.

Como investigación más profunda del sistema interno de los componentes del hormigón se podría realizar un análisis cristalográfico.

Ilustración 7-1. Disco de hormigón para realizar cristalografía



ANEXO A

CÁLCULO DE LA DOSIFICACIÓN DE SCC

1. Resistencia deseada (MPa)

$$f_{cu} := 80$$

2. Viscosidad plástica de la mezcla (Pa·s)

$$\eta_{mix} := 12$$

3. Relación agua cemento

$$A_C := f_{cu} = \frac{195}{12.65^{A_C}} \text{ solve } A_C \rightarrow 0.35110058149793843303 \quad \text{round } [A_C, (4)] = 0.351$$

4. Asumir contenido en agua (kg/m³) y después calcular la cantidad de material cementicio (cm), sabiendo además el porcentaje de (ggbs) que sustituye al cemento (c)

$$w := 184$$

$$cm := \frac{w}{A_C} = 524.066$$

$$\%_{ggbs} := 0\%$$

$$ggbs := \%_{ggbs} \cdot cm = 0$$

$$c := (100\% - \%_{ggbs}) \cdot cm = 524.066$$

5. Asumir una dosificación (%) de super-plastificante como un porcentaje de la masa de cm y calcular el contenido (kg/m³)

$$\%_{SP} := 0.65\%$$

$$SP := cm \cdot \%_{SP} = 3.406$$

6. Estimar la viscosidad de la pasta (Pa·s) a partir de la Tabla 2

$$\eta_{paste} := 0.365$$

7. Estimar dosificación (kg/m³) del filler (LP), agregados finos (FA) y agregados gruesos (CA)

$$u := \left(\frac{\eta_{mix}}{\eta_{paste}} 0.524^{-1.9} \cdot 0.63^{-1.9} \cdot 0.74^{-1.9} \right)^{\left(\frac{1}{-1.9} \right)} = 0.039$$

$$x := \sqrt[3]{u} = 0.339$$

$$t_1 := 1.4$$

$$t_2 := 0.5147$$

$$t_3 := 1 = t_1 \cdot t_2 \cdot t_3 \text{ solve } t_3 \rightarrow 1.387770962280385245\%$$

$$\phi_{LP} := 0.524 - t_1 \cdot x = 0.05$$

$$\phi_{FA} := 0.63 - t_2 \cdot x = 0.456$$

$$\phi_{CA} := 0.74 - t_3 \cdot x = 0.27$$

Para hallar los distintos contenidos se necesitarán las siguientes densidades (kg/m³):

$$\rho_c := 3100$$

$$\rho_{ggs} := 3300$$

$$\rho_w := 1000$$

$$\rho_{SP} := 1040$$

$$\rho_{LP} := 1700$$

$$\rho_{FA} := 2650$$

$$\rho_{CA} := 2800$$

$$LP := \phi_{LP} = \frac{\left(\frac{LP}{\rho_{LP}} \right)}{\left(\frac{c}{\rho_c} + \frac{ggs}{\rho_{ggs}} + \frac{w}{\rho_w} + \frac{SP}{\rho_{SP}} + 0.02 \right) + \left(\frac{LP}{\rho_{LP}} \right)} \text{ solve , LP } \rightarrow 33.519305354348781\%$$

$$FA := \phi_{FA} = \frac{\left(\frac{FA}{\rho_{FA}} \right)}{\left(\frac{c}{\rho_c} + \frac{ggs}{\rho_{ggs}} + \frac{w}{\rho_w} + \frac{SP}{\rho_{SP}} + \frac{LP}{\rho_{LP}} + 0.02 \right) + \left(\frac{FA}{\rho_{FA}} \right)} \text{ solve , FA } \rightarrow 878.535969976665735\%$$

$$CA := \phi_{CA} = \frac{\left(\frac{CA}{\rho_{CA}} \right)}{\left(\frac{c}{\rho_c} + \frac{ggs}{\rho_{ggs}} + \frac{w}{\rho_w} + \frac{SP}{\rho_{SP}} + \frac{LP}{\rho_{LP}} + \frac{FA}{\rho_{FA}} + 0.02 \right) + \left(\frac{CA}{\rho_{CA}} \right)} \text{ solve , CA } \rightarrow 753.2054784924675597\%$$

8. Se calcula el volumen total (m³) de la mezcla y se ajustan las cantidades (kg/m³) para que el volumen total sea 1m³

$$V_{TOTAL} := \frac{c}{\rho_c} + \frac{ggs}{\rho_{ggs}} + \frac{w}{\rho_w} + \frac{SP}{\rho_{SP}} + \frac{LP}{\rho_{LP}} + \frac{FA}{\rho_{FA}} + \frac{CA}{\rho_{CA}} + 0.02 = 0.997$$

$$cm_{adj} := \frac{cm}{V_{TOTAL}} = 525.869 \quad ggs_{adj} := \%_{ggs} \cdot cm_{adj} = 0 \quad c_{adj} := (100\% - \%_{ggs}) \cdot cm_{adj} = 525.869$$

$$w_{adj} := \frac{w}{V_{TOTAL}} = 184.633$$

$$SP_{adj} := \frac{SP}{V_{TOTAL}} = 3.418$$

$$LP_{adj} := \frac{LP}{V_{TOTAL}} = 33.635$$

$$FA_{adj} := \frac{FA}{V_{TOTAL}} = 881.559$$

$$CA_{adj} := \frac{CA}{V_{TOTAL}} = 755.797$$

COMPROBACIÓN

$$V_{TOTAL.adj} := \frac{c_{adj}}{\rho_c} + \frac{ggbs_{adj}}{\rho_{ggbs}} + \frac{w_{adj}}{\rho_w} + \frac{SP_{adj}}{\rho_{SP}} + \frac{LP_{adj}}{\rho_{LP}} + \frac{FA_{adj}}{\rho_{FA}} + \frac{CA_{adj}}{\rho_{CA}} + 0.02 = 1$$

9. Calcular las nuevas fracciones de material ajustadas

$$\phi_{LP.adj} := \frac{\left(\frac{LP_{adj}}{\rho_{LP}} \right)}{\left(\frac{c_{adj}}{\rho_c} + \frac{ggbs_{adj}}{\rho_{ggbs}} + \frac{w_{adj}}{\rho_w} + \frac{SP_{adj}}{\rho_{SP}} + 0.02 \right) + \left(\frac{LP_{adj}}{\rho_{LP}} \right)} = 0.05$$

$$\phi_{FA.adj} := \frac{\left(\frac{FA_{adj}}{\rho_{FA}} \right)}{\left(\frac{c_{adj}}{\rho_c} + \frac{ggbs_{adj}}{\rho_{ggbs}} + \frac{w_{adj}}{\rho_w} + \frac{SP_{adj}}{\rho_{SP}} + \frac{LP_{adj}}{\rho_{LP}} + 0.02 \right) + \left(\frac{FA_{adj}}{\rho_{FA}} \right)} = 0.456$$

$$\phi_{CA.adj} := \frac{\left(\frac{CA_{adj}}{\rho_{CA}} \right)}{\left(\frac{c_{adj}}{\rho_c} + \frac{ggbs_{adj}}{\rho_{ggbs}} + \frac{w_{adj}}{\rho_w} + \frac{SP_{adj}}{\rho_{SP}} + \frac{LP_{adj}}{\rho_{LP}} + \frac{FA_{adj}}{\rho_{FA}} + 0.02 \right) + \left(\frac{CA_{adj}}{\rho_{CA}} \right)} = 0.27$$

10. Se comprueba la viscosidad plástica obtenida (Pa·s) tras el ajuste

$$\eta_{mix.adj} := \eta_{paste} \cdot \left(1 - \frac{\phi_{LP.adj}}{0.524} \right)^{-1.9} \cdot \left(1 - \frac{\phi_{FA.adj}}{0.63} \right)^{-1.9} \cdot \left(1 - \frac{\phi_{CA.adj}}{0.74} \right)^{-1.9} = 12.007$$

11. Comprobar que los valores de las cantidades (kg/m³) de los materiales (LP, FA, CA) están dentro del rango de la EFNARC (Tabla 1), si no cumplen estos rangos se cambian t₁, t₂ y consecuentemente t₃

12. Comprobar que el nuevo valor de la viscosidad de la mezcla está dentro del 5% de error con el objetivo

$$\%_{error} := \left(\frac{\eta_{mix.adj}}{\eta_{mix}} - 1 \right) \cdot 100 = 0.058$$

ANEXO B

CÁLCULO DE LA DOSIFICACIÓN DE SCFRC

1. Resistencia deseada (MPa)

$$f_{cu} := 80$$

2. Viscosidad plástica de la mezcla (Pa·s)

$$\eta_{mix} := 9$$

3. Relación agua cemento

$$A_C := f_{cu} = \frac{195}{12.65^{A_C}} \text{ solve, } A_C \rightarrow 0.35110058149793843303 \text{ round } [A_C, (4)] = 0.351$$

4. Asumir contenido en agua (kg/m³) y después calcular la cantidad de material cementicio (cm), sabiendo además el porcentaje de (ggbs) que sustituye al cemento (c)

$$w := 184$$

$$cm := \frac{w}{A_C} = 524.066$$

$$\%_{ggbs} := 0\%$$

$$ggbs := \%_{ggbs} \cdot cm = 0$$

$$c := (100\% - \%_{ggbs}) \cdot cm = 524.066$$

5. Asumir una dosificación (%) de super-plastificante como un porcentaje de la masa de cm y calcular el contenido (kg/m³)

$$\%_{SP} := 0.65\%$$

$$SP := cm \cdot \%_{SP} = 3.406$$

6. Estimar la viscosidad de la pasta (Pa·s) a partir de la Tabla 2

$$\eta_{paste} := 0.365$$

7. Estimar dosificación (kg/m³) del filler (LP), agregados finos (FA) y agregados gruesos (CA)

$$u := \left(\frac{\eta_{mix}}{\eta_{paste}} 0.524^{-1.9} \cdot 0.63^{-1.9} \cdot 0.74^{-1.9} \right)^{\left(\frac{1}{-1.9} \right)} = 0.045$$

$$x := \sqrt[3]{u} = 0.356$$

$$t_1 := 1.4$$

$$t_2 := 0.5415$$

$$t_3 := 1 = t_1 \cdot t_2 \cdot t_3 \text{ solve, } t_3 \rightarrow 1.319087191663368948$$

$$\phi_{LP} := 0.524 - t_1 \cdot x = 0.025$$

$$\phi_{FA} := 0.63 - t_2 \cdot x = 0.437$$

$$\phi_{CA} := 0.74 - t_3 \cdot x = 0.27$$

Para hallar los distintos contenidos se necesitarán las siguientes densidades (kg/m³):

$$\rho_c := 3100$$

$$\rho_{ggs} := 3300$$

$$\rho_w := 1000$$

$$\rho_{SP} := 1040$$

$$\rho_{LP} := 1700$$

$$\rho_{FA} := 2650$$

$$\rho_{CA} := 2800$$

$$LP := \phi_{LP} = \frac{\left(\frac{LP}{\rho_{LP}} \right)}{\left(\frac{c}{\rho_c} + \frac{ggs}{\rho_{ggs}} + \frac{w}{\rho_w} + \frac{SP}{\rho_{SP}} + 0.02 \right) + \left(\frac{LP}{\rho_{LP}} \right)} \text{ solve ,LP} \rightarrow 16.56365032483386697\%$$

$$FA := \phi_{FA} = \frac{\left(\frac{FA}{\rho_{FA}} \right)}{\left(\frac{c}{\rho_c} + \frac{ggs}{\rho_{ggs}} + \frac{w}{\rho_w} + \frac{SP}{\rho_{SP}} + \frac{LP}{\rho_{LP}} + 0.02 \right) + \left(\frac{FA}{\rho_{FA}} \right)} \text{ solve ,FA} \rightarrow 794.3991832191551740\%$$

$$CA := \phi_{CA} = \frac{\left(\frac{CA}{\rho_{CA}} \right)}{\left(\frac{c}{\rho_c} + \frac{ggs}{\rho_{ggs}} + \frac{w}{\rho_w} + \frac{SP}{\rho_{SP}} + \frac{LP}{\rho_{LP}} + \frac{FA}{\rho_{FA}} + 0.02 \right) + \left(\frac{CA}{\rho_{CA}} \right)} \text{ solve ,CA} \rightarrow 710.5000133646592384\%$$

8. Se calcula el volumen total (m³) de la mezcla y se ajustan las cantidades (kg/m³) para que el volumen total sea 1m³

$$V_{TOTAL} := \frac{c}{\rho_c} + \frac{ggs}{\rho_{ggs}} + \frac{w}{\rho_w} + \frac{SP}{\rho_{SP}} + \frac{LP}{\rho_{LP}} + \frac{FA}{\rho_{FA}} + \frac{CA}{\rho_{CA}} + 0.02 = 0.94$$

$$cm_{adj} := \frac{cm}{V_{TOTAL}} = 557.757 \quad ggs_{adj} := \%_{ggs} \cdot cm_{adj} = 0 \quad c_{adj} := (100\% - \%_{ggs}) \cdot cm_{adj} = 557.757$$

$$w_{adj} := \frac{w}{V_{TOTAL}} = 195.829$$

$$SP_{adj} := \frac{SP}{V_{TOTAL}} = 3.625$$

$$LP_{adj} := \frac{LP}{V_{TOTAL}} = 17.628$$

$$FA_{adj} := \frac{FA}{V_{TOTAL}} = 845.469$$

$$CA_{adj} := \frac{CA}{V_{TOTAL}} = 756.176$$

COMPROBACIÓN

$$V_{\text{TOTAL.adj}} := \frac{c_{\text{adj}}}{\rho_c} + \frac{ggbs_{\text{adj}}}{\rho_{ggbs}} + \frac{w_{\text{adj}}}{\rho_w} + \frac{SP_{\text{adj}}}{\rho_{SP}} + \frac{LP_{\text{adj}}}{\rho_{LP}} + \frac{FA_{\text{adj}}}{\rho_{FA}} + \frac{CA_{\text{adj}}}{\rho_{CA}} + 0.02 = 0.999$$

9. Calcular las nuevas fracciones de material ajustadas

$$\phi_{LP.adj} := \frac{\left(\frac{LP_{\text{adj}}}{\rho_{LP}} \right)}{\left(\frac{c_{\text{adj}}}{\rho_c} + \frac{ggbs_{\text{adj}}}{\rho_{ggbs}} + \frac{w_{\text{adj}}}{\rho_w} + \frac{SP_{\text{adj}}}{\rho_{SP}} + 0.02 \right) + \left(\frac{LP_{\text{adj}}}{\rho_{LP}} \right)} = 0.025$$

$$\phi_{FA.adj} := \frac{\left(\frac{FA_{\text{adj}}}{\rho_{FA}} \right)}{\left(\frac{c_{\text{adj}}}{\rho_c} + \frac{ggbs_{\text{adj}}}{\rho_{ggbs}} + \frac{w_{\text{adj}}}{\rho_w} + \frac{SP_{\text{adj}}}{\rho_{SP}} + \frac{LP_{\text{adj}}}{\rho_{LP}} + 0.02 \right) + \left(\frac{FA_{\text{adj}}}{\rho_{FA}} \right)} = 0.438$$

$$\phi_{CA.adj} := \frac{\left(\frac{CA_{\text{adj}}}{\rho_{CA}} \right)}{\left(\frac{c_{\text{adj}}}{\rho_c} + \frac{ggbs_{\text{adj}}}{\rho_{ggbs}} + \frac{w_{\text{adj}}}{\rho_w} + \frac{SP_{\text{adj}}}{\rho_{SP}} + \frac{LP_{\text{adj}}}{\rho_{LP}} + \frac{FA_{\text{adj}}}{\rho_{FA}} + 0.02 \right) + \left(\frac{CA_{\text{adj}}}{\rho_{CA}} \right)} = 0.27$$

10. Se comprueba la viscosidad plástica obtenida (Pa·s) tras el ajuste

$$\eta_{\text{mix.adj}} := \eta_{\text{paste}} \cdot \left(1 - \frac{\phi_{LP.adj}}{0.524} \right)^{-1.9} \cdot \left(1 - \frac{\phi_{FA.adj}}{0.63} \right)^{-1.9} \cdot \left(1 - \frac{\phi_{CA.adj}}{0.74} \right)^{-1.9} = 9.084$$

11. Comprobar que los valores de las cantidades (kg/m³) de los materiales (LP, FA, CA) están dentro del rango de la EFNARC (Tabla 1), si no cumplen estos rangos se cambian t_1 , t_2 y consecuentemente t_3

12. Comprobar que el nuevo valor de la viscosidad de la mezcla está dentro del 5% de error con el objetivo

$$\%_{\text{error}} := \left(\frac{\eta_{\text{mix.adj}}}{\eta_{\text{mix}}} - 1 \right) \cdot 100 = 0.936$$

13. Adición de fibras de acero

$$pfibr := 0.619\%$$

$$\rho_{\text{acero}} := 7850$$

$$l_d := 65$$

$$\zeta := V_{\text{TOTAL.adj}} \cdot pfibr = 6.182 \times 10^{-3}$$

$$\text{Fibras} := \zeta \cdot \rho_{\text{acero}} = 48.529$$

14. Cálculo de la nueva viscosidad

$$\eta_e := \eta_{mix,adj} \cdot \left[(100\% - \zeta) + \frac{\pi \cdot \zeta \cdot l_d^2}{3 \cdot \ln(2 \cdot l_d)} \right] = 60.075$$

15. Se calcula el volumen total (m³) de la mezcla y se ajustan las cantidades (kg/m³) para que el volumen total sea 1m³

$$V_{TOTALf} := \frac{c_{adj}}{\rho_c} + \frac{ggbs_{adj}}{\rho_{ggbs}} + \frac{w_{adj}}{\rho_w} + \frac{SP_{adj}}{\rho_{SP}} + \frac{LP_{adj}}{\rho_{LP}} + \frac{FA_{adj}}{\rho_{FA}} + \frac{CA_{adj}}{\rho_{CA}} + 0.02 + \frac{Fibras}{\rho_{acero}} = 1.005$$

$$cm_{adjf} := \frac{cm_{adj}}{V_{TOTALf}} = 555.04 \quad ggbs_{adjf} := \%_{ggbs} \cdot cm_{adjf} = 0 \quad c_{adjf} := (100\% - \%_{ggbs}) \cdot cm_{adjf} = 555.04$$

$$w_{adjf} := \frac{w_{adj}}{V_{TOTALf}} = 194.875$$

$$SP_{adjf} := \frac{SP_{adj}}{V_{TOTALf}} = 3.608$$

$$LP_{adjf} := \frac{LP_{adj}}{V_{TOTALf}} = 17.543$$

$$FA_{adjf} := \frac{FA_{adj}}{V_{TOTALf}} = 841.35$$

$$CA_{adjf} := \frac{CA_{adj}}{V_{TOTALf}} = 752.492$$

$$Fibras_f := \frac{Fibras}{V_{TOTALf}} = 48.293$$

COMPROBACIÓN

$$V_{TOTAL,adjf} := \frac{c_{adjf}}{\rho_c} + \frac{ggbs_{adjf}}{\rho_{ggbs}} + \frac{w_{adjf}}{\rho_w} + \frac{SP_{adjf}}{\rho_{SP}} + \frac{LP_{adjf}}{\rho_{LP}} + \frac{FA_{adjf}}{\rho_{FA}} + \frac{CA_{adjf}}{\rho_{CA}} + 0.02 + \frac{Fibras_f}{\rho_{acero}} = 1$$

16. Calcular las nuevas fracciones de material ajustadas

$$\phi_{LP,adjf} := \frac{\left(\frac{LP_{adjf}}{\rho_{LP}} \right)}{\left(\frac{c_{adjf}}{\rho_c} + \frac{ggbs_{adjf}}{\rho_{ggbs}} + \frac{w_{adjf}}{\rho_w} + \frac{SP_{adjf}}{\rho_{SP}} + 0.02 \right) + \left(\frac{LP_{adjf}}{\rho_{LP}} \right)} = 0.025$$

$$\phi_{FA.adjf} := \frac{\left(\frac{FA_{adjf}}{\rho_{FA}} \right)}{\left(\frac{c_{adjf}}{\rho_c} + \frac{ggbs_{adjf}}{\rho_{ggbs}} + \frac{w_{adjf}}{\rho_w} + \frac{SP_{adjf}}{\rho_{SP}} + \frac{LP_{adjf}}{\rho_{LP}} + 0.02 \right) + \left(\frac{FA_{adjf}}{\rho_{FA}} \right)} = 0.438$$

$$\phi_{CA.adjf} := \frac{\left(\frac{CA_{adjf}}{\rho_{CA}} \right)}{\left(\frac{c_{adjf}}{\rho_c} + \frac{ggbs_{adjf}}{\rho_{ggbs}} + \frac{w_{adjf}}{\rho_w} + \frac{SP_{adjf}}{\rho_{SP}} + \frac{LP_{adjf}}{\rho_{LP}} + \frac{FA_{adjf}}{\rho_{FA}} + 0.02 \right) + \left(\frac{CA_{adjf}}{\rho_{CA}} \right)} = 0.27$$

17. Se comprueba la viscosidad plástica obtenida (Pa·s) tras el ajuste

$$\eta_{mix.adjf} := \eta_{paste} \cdot \left(1 - \frac{\phi_{LP.adjf}}{0.524} \right)^{-1.9} \cdot \left(1 - \frac{\phi_{FA.adjf}}{0.63} \right)^{-1.9} \cdot \left(1 - \frac{\phi_{CA.adjf}}{0.74} \right)^{-1.9} = 9.078$$

18. Comprobar que los valores de las cantidades (kg/m³) de los materiales (LP, FA, CA) están dentro del rango de la EFNARC (Tabla 1), si no cumplen estos rangos se cambian t₁, t₂ y consecuentemente t₃

19. Comprobar que el nuevo valor de la viscosidad de la mezcla está dentro del 5% de error con el objetivo

$$\%_{error} := \left(\frac{\eta_{mix.adjf}}{\eta_{mix}} - 1 \right) \cdot 100 = 0.864$$

20. Cálculo de la nueva viscosidad

$$\eta_{nw} := \eta_{mix.adjf} \cdot \left[(100\% - \zeta) + \frac{\pi \cdot \zeta \cdot l_d^2}{3 \cdot \ln(2 \cdot l_d)} \right] = 60.032$$

BIBLIOGRAFÍA

- [1] MANUEL FERNÁNDEZ CÁNOVAS, Hormigón, 2007.
- [2] M.S. ABO DHAHEER, M.M. AL-RUBAYE, W.S. ALYHYA, B.L. KARIHALOO & S. KULASEGARAM (2015): Proportioning of self-compacting concrete mixes based on target plastic viscosity and compressive strength: mix design procedure, Journal of Sustainable Cement-Based Materials, DOI: 10.1080/21650373.2015.1039625
- [3] AKBAR GHANBARI, BUSHAN L. KARIHALOO, Prediction of the plastic viscosity of self-compacting Steel fibre reinforced concrete, 2009.
- [4] CORINALDESI V, MORICONI G. Durable fiber reinforced self-compacting concrete. Cem. Concr. Res. 2004; 35: 249-254.
- [5] WU Q, AN X. Development of a mix design method for SCC based on the rheological characteristics of paste. Constr. Build. Mater. 2014; 53: 642-651.
- [6] OKAMURA H, OUCHI M. Self-compacting concrete. J. Adv. Concr. Technol. 2003; 1: 5-15.
- [7] EFNARC (2005). The European guidelines for self-compacting concrete-specification, production and use. [Online] Available from: www.efnarc.org
- [8] KARIHALOO BL, GHANBARI A. Mix proportioning of self-compacting high-and ultra-high-performance concretes with and without Steel fibres. Mag. Concr. Res. 2012; 64: 1089-1100.
- [9] DEEB R, KARIHALOO BL. Mix proportioning of self-compacting normal and high-strength concretes. Mag. Concr. Res. 2013; 65: 546-556.
- [10] BEIGI MH, BERENJIAN J, LOTFI OMRAN O, SADEGHI NIK A, KIKBIN IM. An experimental survey on combined effects of fibers and nanosilica on the mechanical, rheological, and durability properties of self-compacting concrete. Mater. Des. 2013; 50: 1019-1029.
- [11] FERRARA L, PARK Y-D, DHAH SP. A method for mix-design of fiber-reinforced self-compacting concrete. Cem. Concr. Res. 2007; 37: 957-971.
- [12] DRANSFIELD J. Admixtures for concrete, mortar and grout. Adv. Concr. Technol. Vol. 1: Const. Mater. Elsevier, Oxford, 2003: Newman J, Choo BS, editors. Chapter 4
- [13] G.K. BATCHELOR. The stress generated in a non-dilute suspension of elongated particles by pure straining motion, Journal of Fluid Mechanics Digital Archive 46 (1971) 813-829.
- [14] L. STRUBLE, G-K. SUN, Viscosity of Portland cement paste as a function of concentration, Advanced Cement Based Materials 2 (1995) 62-69.
- [15] A.V. SHENOY, Rheology of Filled Polymer Systems, Springer, 1999, pp. 136-149.
- [16] L.A. UTRACKI, Polymer Blends Handbook, Springer, 2003, pp. 459-461.
- [17] H.A. BARNES, J.F. HUTTON, K. WALTERS, An Introduction to Rheology, Elsevier, 1993, pp. 119-128.
- [18] I.M. KRIEGER, T.J. DOUGHERTY, A mechanism for non-Newtonian flow in suspensions of rigid spheres, Journal of Rheology 3 (1959) 137-152.
- [19] N.A. FRANKEL, A. ACRIVOS, On the viscosity of a concentrated suspension of solid spheres, Chemistry and Engineering Science 22 (1967) 847-853.
- [20] J.S. CHON, E.B. CHRISTIANSEN, A.D. BAER, Rheology of concentrated suspensions, Journal of Applied Polymer Science 15 (1971) 2007-2021.
- [21] N. PHAN-THIEN, B.L. KARIHALOO, Materials with negative poisson's ratio: a qualitative microstructural model, Journal of Applied Mechanics 61 (1994) 1001-1004.

- [22] M.S. ABO DHAHEER, M.M. AL-RUBAYE, W.S. ALYHYA, B.L. KARIHALOO & S. KULASEGARAM (2015): Proportioning of self-compacting concrete mixes based on target plastic viscosity and compressive strength: experimental validation, *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, DOI: 10.1080/21650373.2015.1036952
- [23] Propiedades del Hormigón Fresco. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA)
- [24] Aris, I. (2008). *Altas resistencias del hormigón autocompactante*. [online] Available at: <http://www.concretonline.com> [Accessed 23 Aug. 2016].
- [25] R. Badell, (2016). [online] Available at: <http://www.eic.cat/gfe/docs/14224.pdf> [Accessed 5 Sep. 2016].
- [26] Ensayos de hormigón endurecido. Parte 13: Determinación del módulo secante de elasticidad en compresión. UNE-EN 12390-13.
- [27] Resistencia a tracción indirecta (Ensayo Brasileño) Hormigón Endurecido. Departamento de R+D+I del Institut Tecnològic de Lleida. [online] Available at: <http://www2.itl.cat:8080/Formacio/Es/web/FitxesTec/FichasTec.aspx?id=AP-017> [Accessed 11 Sep. 2016].
- [28] Notasdehormigonarmado.blogspot.com.es. (2016). *8º METODO DE ENSAYO A TRACCIÓN INDIRECTA (ENSAYO BRASILEÑO) Son de aplicación las Normas UNE 83.306 e ISO 4108, | Notas de Hormigón Armado*. [online] Available at: <http://notasdehormigonarmado.blogspot.com.es/2011/04/8-metodo-de-ensayo-traccion-indirecta.html> [Accessed 11 Sep. 2016].
- [29] Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas. UNE-EN 12390-13.
- [30] HÉCTOR CIFUENTES BULTÉ, FERNANDO MEDINA ENCINA. *Mecánica de la fractura aplicada al hormigón: conceptos, análisis experimental y modelos numéricos* (2013).
- [31] Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual). UNE-EN 14651:2007+A1.